АКАДЕМИЯ НАУК
СОЮЗА СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК

Д. И. МЕНДЕЛЕЕВ

СОЧИНЕНИЯ

Том VI

под общей редакцией акад. В. Е. Тищенко
Куратор тома проф. Б. П. Вейнберг

ГОНТИ • НКТП • СССР
РЕДАКЦИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
ЛЕНИНГРАД 1939 МОСКВА

ХЛ—11, 15, 4

Напечатано по распоряжению Академии Наук СССР
Президент Академии: акад. В. Л. Комаров

ГАЗЫ

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть	По вине
140	9 сверху	66,4	65,4	Ред.
215	2 снизу	132	82	„
539	17 сверху	[=222]	[=522]	„
631	2 снизу	[=633—635]	[см. примеч. к стр. 215]	„
637	1 сверху	673	637	Тип.
677	10 снизу	[=621—630]	[=633—635]	Ред.
679	2 снизу	LXXII—450 [=633—635]	LXXXII—450 (в подлиннике опечатка LXXVII — см. примеч. к стр. 215)	„

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Об определении плотности газов и паров в применении к анализу (из Аналитической химии 1866 г.) 8
Выписки, относящиеся к газам, из 1-го издания Основ Химии (1869—1871) 66
Выписка из протокола заседания Русского Химического О-ва 13 января 1872 г. 98
Пульсирующий насос (1872) 99
Выписка из протокола заседания Русского Химического Общества 2 марта 1872 г.(об изменении плотностей газов с давлением) 126
О сжимаемости газов (1872) 128
Выписка из протокола заседания Русского Физического Общества от 8 марта 1873 г. (о дифференциальном барометре) 172
Выписка из протокола заседания Русского Физического Общества от 8 марта 1873 г. (о способе кипячения ртути) 173
Выписка из протокола заседания Физического Общества от 10 мая 1873 г. (об устройстве дифференциального барометра) 174
Предварительная заметка об определении высот дифференциальным барометром Д. Менделеева и В. Гемилиана (1873) 175
Высотомер или дифференциальный барометр для нивеллирования, устроенный проф. С.-Петербургского Университета Д. И. Менделеевым (1873) 181
Выписка из протокола заседания Русского Химического Общества от 13 декабря 1873 г. (о разрыве стеклянных трубок) 187
Выписка из протокола заседания Русского Химического Общества от 13 декабря 1873 г. (о метрической системе измерения температур) . . 188
Выписка из протокола заседания Русского Физического Общества от 20 декабря 1873 г. (о точном определении температур) 190
Выписка из протокола заседания Русского Физического Общества от 5 марта 1874 г. (о сжимаемости воздуха под давлениями, меньшими атмосферного) 192
Выписка из протокола заседания Русского Химического Общества от 7 марта 1874 г. (об упругости разреженного воздуха) 193
* Предварительная заметка об упругости разреженного газа Д. И. Менделеева и М. Кирпичева (1874) 194
Выписка из протокола заседания Русского Физического Общества от 8 апреля 1874 г. (два дифференциальных барометра) 199
Выписка из протокола заседания Русского Физического Общества от 8 апреля 1874 г. (новый вид ртутного барометра) 200
Выписка из протокола заседания Химического Общества от 2 мая 1874 г. (о ртутном насосе). 202
Выписка из протокола заседания Русского Физического Общества от 7 мая 1874 г. (о ртутном насосе) 203
Выписка из протокола заседания Русского Химического Общества от 12 сентября 1874 г. (об опытах Зильештрема) 204
Выписка из протокола заседания Русского Физического Общества от 17 сентября 1874 г. (об опытах Зильештрема) 205
* Об опытах Зильештрема над упругостью разреженных газов 206

* Статьи, обозначенные *, переведены Б. П. Вейнбергом.

Стр.

Выписка из протокола заседания Русского Химического Общества от 12 сентября 1874 г. (общие формулы для газов) 211
Выписка из протокола заседания Русского Физического Общества от 17 сентября 1874 г. (общие формулы для газов) 212
Выписка из протокола заседания Русского Химического Общества от 6 марта 1875 г. (о М. Л. Кирпичеве) 213
Выписка из протокола заседания Русского Физического Общества от 4 ноября 1875 г. (определение коэффициента расширения воздуха) 215
Выписка из протокола заседания Русского Химического Общества от 6 ноября 1875 г. (о коэффициенте расширения воздуха). 219
Об упругости газов (1875) 221
О воздухе (1875). 590
* Замечание относительно возражения г. Зильештрема (1875) 617
Выписка из протокола заседания Русского Физического Общества от 2 декабря 1875 г. (возражение С. А. Усову по поводу коэффициента расширения воздуха) 619
Выписка из протокола заседания Русского Физического Общества от 13 апреля 1876 г. (о депрессии ртути в трубках) 621
О барометрическом нивеллировании и применении для него высотомера (1876) 623
Выписка из протокола заседания Русского Физического Общества от 4 мая 1876 г. (о сжимаемости газов при малых давлениях) 624
Выписка из протокола заседания Русского Химического Общества от 26 мая 1876 г. (о сжимаемости газов при малых давлениях). 626
* О сжимаемости газов при давлениях ниже одной атмосферы (1876). . . 627
Выписка из протокола заседания Русского Физического Общества от 4 мая 1876 г. о коэффициенте расширения при атмосферном давлении. 631
Выписка из протокола заседания Русского Химического Общества от 26 мая 1876 г. (о коэффициенте расширения газов при атмосферном давлении) 632
* Отступления в законах, относящихся к газам (1876). 633
Выписка из протокола заседания секции физики и физической географии V съезда русских естествоиспытателей и врачей 3 сентября 1876 г. (о сжимаемости газов под давлением немного больше атмосферного) 636
Выписка из протокола заседания Русского Химического Общества от 2 декабря 1876 г. (об изменении упругости воздуха при нагревании от 0° до 100°) 638
Выписка из протокола заседания Русского Физического Общества от 5 мая 1877 г. (об истинных коэффициентах расширения газов) 639
Выписка из протокола заседания Русского Химического Общества от 7 апреля 1877 г. (о живой силе молекул) 641
* Исследования над законом Мариотта (1877) 642
Выписки, касающиеся газов, из 3-го и 4-го изданий «Основ Химии» (1877 и 1882) 654
Об опытах над упругостью газов (1881) 663
Выписка из протокола заседания Русского Физического Общества от 6 января 1883 г. (прибор для определения плотности пара) 685
Выписки, касающиеся газов, из 5-го издания «Основ Химии» (1889) . . . 686

Аналитическая Химия, изданная под редакцией Д. Менделеева. Количественный анализ, вып. второй. СПБ. Издание т-ва „Общественная Польза" 1866 г. Стр. V-VI, VIII, 291—365.

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПЛОТНОСТИ ПАРОВ И ГАЗОВ В ПРИМЕНЕНИИ К АНАЛИЗУ

Из курса Количественного анализа Д. И. Менделеева здесь перепечатывается только глава IV «Определение плотности пара и газов», составленная им, и предисловие.

Предисловие

Стр. V—VI

Второй выпуск «Количественного анализа» назначен для описания тех общих способов химического исследования, которые, служа для определения количественного состава тел, отличаются часто весьма поучительною и характерною особенностью приемов, не свойственных обыкновенному анализу, производимому чрез взвешивание тел, выделенных в осадки. Важное значение этих приемов анализа для химической практики часто ускользает от внимания изучающих химию при описании их на ряду с обыкновенными способами анализа, а потому я считал полезным выделить их и соединить в особый выпуск. К этому принудило меня кроме того отсутствие в иностранной литературе довольно полных, новых и необширных по объему описаний вышеуказанных анализов, так что пришлось заняться составлением более или менее оригинальных статей по этим предметам. Этот труд приняли на себя лица, хорошо мне известные по моей педагогической деятельности: П. П. Алексеев изложил органический анализ; Г. Г. Густавсон—газовый и В. Ю. Рихтер — титрованный анализ. Доля моего личного участия в этих трудах весьма незначительна, и если предлагаемая книга послужит для желаемой пользы начинающим практическое изучение химии и для бо́льшего распространения у нас в России ближайшего знакомства с изящными методами упомянутых анализов, то честь этого должна принадлежать названным выше моим сотрудникам.

Д. Менделеев

Выписка из оглавления

Стр. VIII

IV. Определение плотности паров и газов Д. Менделеева

Вступление 291
Вычисление плотности газа или пара 292
Основные понятия, необходимые для определения плотностей газов и паров 296
Вес воздуха 298. Определение и поправки веса 301. Определение и

поправки объема 307. Определение и поправки температур 309. Поправки на давление 318. Поправки на оставшийся воздух 319
Приемы для определения плотности газов 323
О приемах для определения плотностей паров 338
Степень точности в определении плотности паров и газов 348
Таблицы 452

Об определении плотности паров и газов в применении к анализу

Д. Менделеева

Стр. 291—365

При аналитических исследованиях газов и летучих тел часто весьма большую пользу извлекают из сведения о плотности вещества в газообразном состоянии. Так, например, для определения и поверки результатов анализа, свойств и состава светильного газа, весьма полезно знать его плотность. Светильный газ, заключающий много болотного газа и водорода, легче того, который заключает меньшее количество этих газов. При исследовании летучих веществ элементарный состав может быть проверен чрез определение плотности пара, потому что часто малым разностям в составе соответствуют большие разности в плотностях; напр.

Состав	C^6H^{10}	и $C^{10}H^{16}$;	разность
Углерода	87,8	88,2%	0,4
Водорода	12,2	11,8	0,4
Плотность пара . .	2,8	4,7	1,9

При полимерных телах состав не решает вопроса о природе тела, а это решение должно искать в исследовании свойств, реакций и особенно в определении плотности пара. Плотность пара может часто решить вопрос о чистоте или нечистоте данного летучего продукта. Для многих тел это есть единственный путь для определения веса частицы, для всех тел сведение о плотности пара дает возможность судить о том сжатии (или степени проникания материи), которое произошло при образовании тела из составных его частей. Таким образом и для теоретической, и для практической стороны науки определение плотности тел в газообразном или парообразном состояниях имеет столь большое значение, что мы рассмотрим этот вопрос с возможно бо́льшею разносторонностью, если и не будем вдаваться в описание некоторых подробностей частных приемов.

Все изложение предмета распределяем на следующие отделы:

1) Вычисление по составу плотности газа или пара.

2) Основные понятия, необходимые для производства определения плотности пара или газа.

3) О приемах для определения плотности газов.

4) О приемах для определения плотности пара тел летучих.

5) О степени точности в определении плотностей.

Необходимо заметить, что при составлении этой статьи мы имели в виду химическую практику в ее совершенном состоянии, а потому не касались описания тех приемов, которые употребляются при нормальных определениях, какими должно считать, например, определения плотности важнейших газов, сделанные Реньо.

I. Вычисления плотности газа или пара

Если известна частичная формула тела, то легко определить (приблизительно) и плотность его пара или газа, потому что частичная формула выражает (приблизительно) вес того объема тела, какой в два раза больше объема, занимаемого паем водорода.

Пай водорода = 1, плотность его, по Реньо, равна 0,0693, следовательно, относительный объем, занимаемый паем водорода есть

$$\frac{1}{0,0693} = 14,43.$$

Следовательно, принимая пай водорода за 1, определяя вес частицы какого-либо тела и разделяя этот вес на плотность пара, частное даст величину, близкую к 28,86 (т. е. 2 раза 14,43). Это можно выразить формулою:

$$\frac{P}{D} = 28,86.$$

Здесь P означает вес частицы, а D — плотность пара или газа.

Эта формула, как известно, составляет основное положение частичной химии (см. Менделеева, «Органическая химия», введение). Из нее очевидно, что

$$D = \frac{P}{28,86}$$

Следовательно, если известен вес частицы, известна и приблизительная (теоретическая) плотность пара или газа.

По этой формуле можем, например, вычислить плотность паров треххлористого фосфора PCl^3. Вес его частицы $= 31 + 3 \times 35,5 = 137,5$, а потому плотность пара

$$D = \frac{137,5}{28,86} = 4,76.$$

Действительно же, по определениям Дюма, плотность паров равна 4,875.

Что касается до степени согласия теоретической плотности с наблюдаемою, то необходимо заметить: 1) что при самых точнейших наблюдениях нет строгого согласия, что зависит от бо́льшего или меньшего удаления газа или пара от его температуры превращения в жидкость, то есть от точки кипения, отчего газы и пары ни при расширении от теплоты, ни при изменении своего объема от давления, не следуют равномерным законам. В наибо́льшем удалении от жидкого состояния должно представлять себе газы с одинаковым коэффициентом расшире-

ния и следующими закону Мариотта, так называемые, совершенные газы и тогда, вероятно, наступит для них одно из двух: или полное равенство частных $\frac{P}{D}$, или же эти частные будут разнствовать (во всяком случае незначительно) между собою, но эти разности будут ясно зависеть от состава газов и от веса частицы. В том состоянии, в каком мы имеем дело с газами и парами, они представляют несомненные разности, хотя никогда не значительные, но до сих пор необъяснимые.

2) При обыкновенных в химической практике наблюдениях степень точности получаемых данных весьма не велика, что и составляет вторую причину разногласия теоретической плотности от наблюдаемой. Мы рассмотрим впоследствии в особом отделе степень точности, до какой могут достигать определения плотностей по обыкновеннейшим методам.

Итак, вычисляемые и наблюдаемые плотности только близки между собою, а не тождественны. Это должно иметь постоянно в виду при пользовании вычисленными плотностями.

Теоретическую плотность очень часто вычисляют другим способом по составу частицы. Возьмем пример: Положим, тело содержит в своей частице $C^nH^mO^r$, вес его пая

$$P = 12n + m + 16r;$$

следовательно:

$$D = \frac{12n + m + 16r}{28{,}86} = \underset{\text{углерода}}{0{,}416 \cdot n} + \underset{\text{водорода}}{0{,}0346 \cdot m} + \underset{\text{кислорода}}{0{,}554 \cdot r}.$$

Коэффициенты при *m* и *r* (то есть 0,0346 и 0,554) в два раза менее плотностей водорода и кислорода (0,0693 и 1,1056), по аналогии принимается, что и коэффициент 0,416 в два раза менее плотности (неизвестной) паров углерода, а потому, приняв плотности:

углерода . . .	0,832
водорода . . .	0,069
кислорода . .	1,106

получим следующее выражение для определения теоретической плотности пара:

$$D = \frac{0{,}832 \cdot n + 0{,}069 \cdot m + 1{,}106 \cdot r}{2};$$

то-есть, для вычисления плотности пара сложного тела должно знать число паев, входящих в частицу, и плотность пара составных начал, соответственные величины (то-есть число паев данного элемента и его плотность) должно перемножить, произведения сложить и сумму разделить на 2 [1]; частное будет искомая теоретическая плотность D.

Это правило для вычисления плотностей пара может быть найдено и другим путем, но на выводе его мы не останавливаемся, потому что

---

[1] При четырех объемных формулах и соответствующих паях (C = 6, H = 1, O = 8) сумму должно разделить не на 2, а на 4.

для некоторых элементов (серы) известно две плотности пара (6,6 и 2,2), для других она вовсе неизвестна, а потому в выводе теоретической плотности сложного тела должны участвовать гипотезы, которых по первому правилу $\left(\frac{P}{D} = 28{,}86\right)$ можно избежать.

Для вычисления плотности газовой смеси необходимо знать, как количество газов, входящих в состав смеси, так и плотность каждой составной части. Если в m объемах смеси содержится n объемов первого газа и n' объемов второго газа, и если плотность первого $= d$, а второго d', то плотность смеси, очевидно, будет:

$$D = \frac{nd + n'd'}{m}, \text{ где } m = n + n',$$

если смешанные газы не оказывают никакого химического действия друг на друга. Так, например, плотность гремучего газа (2 объема водорода и 1 объем кислорода $= 3$ объемам гремучего газа) равна

$$\frac{2 \cdot 0{,}069 + 1{,}106}{3} = 0{,}415.$$

Это простое правило может служить для всех случаев смешения газов и паров. Его должно прилагать впрочем с большою осторожностью, потому что во многих случаях смешанные газы оказывают химическое взаимодействие и тем изменяют плотность смеси. Это относится преимущественно к смеси газов с парами. Тем не менее вышеприведенное правило может оказать большую пользу для практики в тех случаях, когда нельзя определить плотности (например, вследствие разлагаемости или невозможности получения в чистом виде) отдельного газа или пара, а легко определить ее в состоянии смешения с другим не действующим газом или паром. Если, например, неизвестно d', а определена плотность смеси D, то очевидно,

$$d' = \frac{Dm - nd}{n'}, \text{ где } m = n' + n,$$

где n и n' суть доли объемов смешанных газов. Если количества смешанных газов даны по весу, то необходимо знать объем m смеси, потому что тогда объем n' определится чрез выражение $n' = m - n$, объем же n определится, зная плотность подмешанного газа или пара. Если, например, дано, что смесь содержит по весу q частей подмешанного газа или пара и q′ частей искомого газа, то вес всей смеси $= q + q'$, объем всей смеси $m = \frac{q + q'}{D}$, объем подмешанного газа $n = \frac{q}{d}$, следовательно, $n' = \frac{q + q'}{D} - \frac{q}{d}$, а потому:

$$d' = \frac{q + q' - q}{\frac{q + q'}{D} - \frac{q}{d}} = \frac{q'}{\frac{q + q'}{D} - \frac{q}{d}}.$$

О применении этого способа к определению плотностей мы не станем впоследствии говорить, потому что основы этого способа весьма про-

сты, а результаты во многих случаях значительно разноречивы, что зависит, по всей вероятности, как от взаимнодействия смешанных тел, так и от неизвестного еще вполне закона изменения плотностей при неполном насыщении, что бывает при смешении газов с парами.

II. Основные понятия, необходимые для определения плотностей газов или паров

Необходимо различить понятия — плотность и удельный вес [1]: одно есть понятие относительное, другое более абсолютно, что особенно ясно видно в применении к газам и парам.

Плотностью называют отношение (частное) между весами равных объемов двух тел, из которых одно принимается за норму для сравнения всех других. При газах и парах за такое тело берется воздух, а потому плотность газа или пара показывает отношение между весами равных объемов газа или пара и воздуха, взятыми при одних и тех же условиях то-есть при одной температуре, при равных давлениях, под одною широтою, на одной высоте над уровнем моря и пр. Очевидно, что величина плотности не зависит ни от системы веса и меры, ни от многих других переменных; она бы вовсе не зависела ни от давления, ни от температуры, если бы законы Мариотта и Гэй-Люссака были вполне точны, но так как давление и температура оказывают почти одинаковое влияние на объемы как паров и газов, так и воздуха, то величина плотности не зависит почти ни от температуры, ни от давления. В этом смысле плотность пара или газа есть величина постоянная. Во сколько изменится, с переменою условий, вес данного объема газа, во столько же (почти) меняется и вес воздуха, а потому плотность, как частное (дробь), остается при разных обстоятельствах величиною (почти) постоянною. Для химической практики имеет значение только та плотность пара или газа, которая остается (почти) постоянною. Есть состояния (около температуры кипения, или разложения), в которых объем паров изменяется весьма неравномерно с изменением такового же объема воздуха, в таких состояниях плотность непостоянна, есть величина изменчивая, а потому ее значения тогда не следует смешивать с обыкновенным значением плотности. Очевидно далее, что понятие о плотности есть понятие относительное. Если мы желаем получить по ней сведение об весе или объеме данного газа или пара при известных условиях, то необходимо предварительно знать вес или объем воздуха, взятого при данных условиях, и тогда уже только можем определить искомый вес или объем газа, или пара; без этого предварительного сведения, величина плотности сама собой не дает никакого реального результата.

Под удельным весом мы будем разуметь вес одной кубической меры данного вещества. В научных исследованиях за единицу объемов удобнее всего признавать кубический сантиметр (или же литр, то-есть ку-

[1] Должно заметить, что эти два понятия различаются обыкновенно ясно, но названия их часто взаимно перемешиваются, особенно на русском языке. Я употребляю слова эти в том смысле, в каком встречаются они чаще всего в обыденной практике. Слово и понятие плотности чаще других употребляются.

бический дециметр) и выражать вес в граммах (а при литре в килограммах), потому что воды, посредством которой меряются объемы, в 1-м куб. сантиметре, при наибольшей плотности воды (при известных условиях) вмещается 1 грамм (в литре 1 килограмм). И так удельный вес показывает число граммов вещества, вмещающегося в 1-м куб. сантиметре.

Так как та и другая (грамм и куб. сантиметр) единицы измерения даны заранее, суть хотя условные, но постоянные величины, то выражение удельного веса заключает в себе абсолютное значение. Но так как вес одного куб. сантиметра вещества изменяется с переменою географической широты и с возвышением над уровнем моря, а также с температурою и давлением, то для данного вещества удельный вес есть величина весьма непостоянная. Зато, когда дан удельный вес — указаны положительные свойства тела, без отношения к другому какому-либо веществу.

В химической практике обыкновенно имеют дело с плотностями паров и газов. Для большей же части физических и механических исследований особенно важно знать удельный вес. Впрочем, связь понятий удельного веса и плотности столь проста, что всегда легко перейти от одного понятия к другому, стоит только знать удельный вес воздуха. Умножив плотность на удельный вес воздуха, получим удельный вес, а разделив удельный вес тела на удельный вес воздуха, получим плотность тела. Если означим чрез Δ удельный вес тела, а чрез D его плотность, чрез B удельный вес воздуха, взятого при тех же условиях, при каких взято и тело, то:

$$D = \frac{\Delta}{B},$$

а потому $\Delta = D \cdot B$.

Следовательно, если известно B — переход от удельного веса к плотности и обратно весьма прост. Так как для определения плотностей обыкновенно, собственно говоря, определяют удельный вес, то и необходимо предварительно получить полное сведение об удельном весе воздуха B, чтобы определять плотности.

Весьма тщательные исследования Реньо показали, что один куб. сантиметр сухого воздуха, лишенного углекислоты, при широте 45°, на уровне моря при 0° и при 760 миллиметрах давления, измеренного ртутным столбом при 0°, весит E = 0,0012927 граммов. С переменою широты изменение этой величины определяется чрез помножение ее на $1 - 0{,}0026 \cos 2\alpha$, где α означает широту места, так что при уровне моря при широте 60° (около Петербурга) при нормальных условиях 1 куб. сант. воздуха весит:

$$0{,}0012927(1 - 0{,}0026 \cos 120) = 0{,}0012944.$$

С переменою высоты над уровнем моря изменение величины E определяется через разделение на $1 + \frac{2h}{R}$, где h есть возвышение места наблюдения над уровнем моря, а R есть величина радиуса земли (в метрах = 6366200), так что при широте 60° и при высоте над уровнем

моря = 500 метрам (около 250 сажен) вес одного куб. сантиметра воздуха равняется:

$$\frac{0{,}0012944}{1+\frac{1000}{6366200}} = 0{,}0012942.$$

Из этих примеров видно, что изменение удельного веса воздуха с широтою и высотою места столь незначительно, что в пределах обыкновенной точности наблюдений им можно пренебречь. Действительно, на 1 литр изменение достигает во взятом примере 0,0017 грамма или около 2-х миллиграммов, а такую разность веса при больших (неизбежных) нагрузках показывают только особенно тщательно устроенные весы при особых предосторожностях, а потому поправку на широту и высоту места можно не вводить и принять, что вес 1 кубич. сантиметра сухого, без углекислоты, при 0° и 760 миллиметрах равен 0,001293.

Для сравнения плотностей принимается за единицу вес воздуха сухого и не содержащего углекислоты, а потому нужно только знать изменение удельного веса воздуха с температурою и давлением. Это изменение выражается так:

$$B = \frac{0{,}001293 \cdot H}{(1+0{,}00366t)\cdot 760} \text{ граммов,}$$

где B означает удельный вес воздуха при температуре $t°$ и при давлении, измеренном ртутью (при 0°), равном H миллиметров. Точность этой величины, при совершенной точности в определении давлений (H от 700 до 800 *мм*) и температуре (до 300°) не превышает 0,000005, а потому вышеприведенных десятичных знаков совершенно достаточно для вычислений.

Если дело идет об определении веса одного кубического сантиметра обыкновенного воздуха, то должно принять во внимание содержание в нем углекислоты и влажности. Содержание первой довольно постоянно, второй же изменчиво. Принимая 0,0004 углекислого газа в воздухе, получим его удельный вес при 0° и 760 мм = 0,0012933; следовательно, она не оказывает чувствительного влияния, влажность же оказывает весьма заметное влияние. Вес одного куб. сантиметра влажного воздуха определяется выражениями:

$$e_1 = \frac{0{,}001293}{1+0{,}00366t} \cdot \frac{H - \frac{3}{8}QR}{760},$$

где Q есть степень влажности воздуха (отнесенная к 1-це и определяется гигрометрическими способами), а R есть давление насыщенного водяного пара, соответствующее температуре наблюдения. Величины R даны в таблице, приложенной к концу книги. Та же величина определяется еще выражением:

$$e_1 = \frac{0{,}001293}{1+0{,}00366t} \cdot \frac{H}{760} - \frac{3}{5}Z,$$

где Z выражает вес водяного пара, заключающийся в 1-ом куб. сантиметре воздуха, что определяется химическим общеизвестным способом.

Для тех случаев, где требуется определить вес влажного воздуха без особенной точности, достигаемой притом с трудом, как, например, при обыкновенных в химической практике способах определения плотностей пара, там можно довольствоваться выражением:

$$e = 0{,}001209 - 0{,}0000048\ (t - 10) + 0{,}0000016\ (H - 740),$$

которое объяснено в моем сочинении «О соединении спирта с водою» 1865 г., стр. 54. Данные по этой формуле приведены в конце книги и в вышеназванном сочинении.

Если приходится делать часто определения веса 1-го куб. сант. обыкновенного воздуха (для поправок на взвешивание), то полезно и весьма удобно иметь большой запаянный шар, которого наружный объем V при 0° и истинный вес p раз точно определены. Стоит узнать тогда вес этого шара p_1 в воздухе, чтобы судить о весе воздуха e_1.

$$e_1 = \frac{p - p_1}{V\,(t + 0{,}000027t)} - \frac{p}{a},$$

где 0,000027 есть коэффициент расширения стекла, a есть уд. вес гирь, для латуни $a = 8{,}5$ (около) и где поправками можно, для более грубых определений, пренебречь.
Тогда будет:

$$e_1 = \frac{p - p_1}{V};$$

здесь p находится без поправки веса гирь на взвешивание в воздухе, а V не приводится к 0°.

Итак должно ясно отличать удельный вес сухого воздуха, принимаемого для сравнения при плотностях, от веса обыкновенного влажного воздуха, а потому в конце книги приложены обе таблицы — веса сухого и влажного воздуха.

После этих предварительных замечаний перейдем к определению плотности паров и газов.

Если мы имеем сосуд, вмещающий в себя ровно V куб. сантиметров, вместим в него, при известных t и H, сперва пар или газ, а потом воздух и взвесим количества вмещающихся газа или пара P и воздуха p, то, очевидно, что плотность

$$D = \frac{P}{p}.$$

Вес воздуха p можно не определять, если известен объем сосуда в куб. сантиметрах V, стоит только помножить V на B, то-есть на удельный вес воздуха, взятого при тех условиях, при которых определен вес газа или пара, а потому:

$$D = \frac{P}{V \cdot \frac{0{,}001293}{1 + 0{,}00366t} \cdot \frac{H}{760}}.$$

Таким образом для определения плотности газа или пара необходимо определить четыре величины P, V, t и H. Рассмотрим способ их определения в отдельности.

1) Вес газа или пара P, занимающего объем V при t° и H мм. Этот вес P определяется всегда из разности двух взвешиваний и поправляется на взвешивание в воздухе, как при других анализах.

Определение веса производится различными способами. Чаще всего берут сосуд определенной емкости (запирающийся краном или запаиваемый для взвешивания) и известного веса. Его наполняют газом или паром и взвешивают. Этот способ самый прямой, требует наибо́льших предосторожностей при своем выполнении, особенно же тщательного взвешивания и точных поправок на взвешивание. Действительно, вес сосуда обыкновенно весьма велик сравнительно с весом помещающегося в нем газа или пара (конечно, сосуд берется по возможности легкий) и вес пустого сосуда можно найти или только чрез выкачивание изнутри его воздуха или чрез вычисление, вес же сосуда с газом необходимо исправить вполне точно на взвешивание в воздухе. Мы приводим вслед за сим способ, дающий возможность избежать многих из этих поправок; но теперь опишем непосредственный способ определения веса P газа или пара, помещающегося в сосуде.

Сосуд сперва вымывают и высушивают внутри и снаружи и потом взвешивают. Найденный вес назовем A. При этом взвешивании необходимо, чтобы внутри сосуда находился тот самый (та же температура и влажность) воздух, какой находится в весах или чтобы из сосуда был выкачан воздух, если сосуд плотно запирается краном — иначе нельзя определить (простыми способами) истинный вес пустого сосуда, который необходимо знать вполне точно. Если сосуд не снабжен краном, то его, после высушивания, нагревают и дают ему охладиться в течение нескольких часов под весами, помещенными в комнате, имеющей постоянную температуру. Тогда можно предполагать, что в сосуде будет воздух весов. При взвешивании определяют температуру воздуха под весами и давление барометра, а если требуются весьма точные определения, то определяют и влажность воздуха. По этим данным находят вышеописанным способом вес e_1 одного куб. сантиметра воздуха. Из веса A должно вычесть вес воздуха, вмещающегося в сосуд, и вес воздуха, вытесняемого гирями, и приложить вес воздуха, вымещаемого сосудом, тогда получится истинный вес пустого сосуда в безвоздушном пространстве. Вес воздуха, помещающегося в сосуде, равен e_1, умноженному на V, т. е. на емкость сосуда, об определении которой мы будем говорить вслед за сим. Вес воздуха, вытесняемого гирями, равен e_1, умноженному на объем гирь, а этот последний равен их весу A, деленному на их удельный вес. Для обыкновенных латунных гирь он близок 8,5. В точнейших определениях необходимо знать этот удельный вес для каждой гири. Вес воздуха, вымещаемого сосудом, равен e_1, умноженному на емкость сосуда + объем стенок сосуда, а этот последний равен весу сосуда, деленному на удельный вес материала (стекла), из которого сделан сосуд. Для обыкновенного стекла он близок к 2,5. Если сосуд сделан из нескольких материалов, то необходимо в точных определениях особым исследованием определить объем стенок сосуда [1].

[1] В моем сочинении «О соединении спирта с водою» можно найти способ, для этого пригодный. *Д. Менделеев.*

Если означим чрез a уд. вес гирек, чрез b уд. вес стенок сосуда, то истинный вес пустого сосуда

$$B = A - e_1 V - e_1 \frac{A}{a} + e_1 \left(\frac{B}{b} + V \right),$$

откуда

$$B = A \frac{1 - \frac{e_1}{a}}{1 - \frac{e_1}{b}},$$

или же, упрощая, пренебрегая малыми разностями и подставляя для a и b их численные значения, истинный вес сосуда почти равен:

$$B = A + e_1 A \left(\frac{1}{b} - \frac{1}{a} \right) = A + e_1 A \cdot 0{,}28.$$

Этой поправки избегать при точных определениях никогда не следует.

Когда сосуд, назначаемый для определения плотности, снабжен плотным краном, то можно сделать более скорое и точное определение. Из прибора выкачивают воздух, наполняют прибор сухим воздухом и вновь выкачивают воздух, пока возможно, примерно хоть до 2 мм. давления и при закрытии крана определяют по проверенному манометру воздушного насоса давление воздуха (в миллиметрах высоты ртути), оставшегося в сосуде. Пусть он будет h, заметить температуру в обыкновенных определениях нет нужды, потому что она мало изменяет вес оставшегося воздуха при слабом давлении. Тогда сосуд взвешивают, осушив снаружи, и наблюдают температуру и давление воздуха, по которым находят e_1. Истинный вес пустого сосуда будет равен:

$$B = A_1 + e_1 \left[V + \frac{B}{b} - \frac{A}{a} \right] - \frac{0{,}00129\, h}{760},$$

где буквы A, B, e_1 и a имеют вышеприведенное значение. Упрощая предыдущую формулу, получим:

$$B = A_1 + e_1 (V + A_1 \cdot 0{,}28) - \frac{h}{390000}.$$

Точность этого последнего способа зависит от того, что здесь не нужно, как в предыдущем способе, судить о температуре и давлении воздуха внутри прибора, по температуре и давлению вне его, как в предыдущем способе, но эта точность достигается только при весьма тщательном определении e_1 — иначе первый способ дает более верный результат, потому что по первому способу e_1 умножается на меньшую величину, чем при втором способе.

Когда известен истинный вес B пустого сосуда, то наполняют его газом или паром по способам, которые будут далее описаны, и взвешивают, заперши кран или запаяв сосуд, чтобы воздух не мог входить

в прибор. Найдется кажущийся вес C, по которому требуется определить истинный вес D сосуда с газом или паром. Очевидно, что

$$D = C + e_2\left(V + \frac{B}{b} - \frac{C}{a}\right),$$ [1]

и что

$$P = D - B,$$

e_2 есть вес одного кубического сантиметра воздуха при втором взвешивании. При сколько-либо тщательных опытах нельзя упускать всех вышеприведенных поправок, только при более грубых (обыкновенных) опытах можно принять $e_1 = e_2$, если оба взвешивания скоро следовали друг за другом и тогда (если вес сосуда был определен по второму способу) получим, приближенно:

$$P = C + e_2\left(V + \frac{A}{b} - \frac{C}{a}\right) - A -$$
$$- e_2\left[V + A\left(\frac{1}{b} - \frac{1}{a}\right)\right] + \frac{h}{590000},$$

или

$$P = C - A - e_2\frac{C - A}{a} + \frac{h}{590000};$$

или еще проще $P = C - A$, потому что последние члены весьма малы и входят еще с противными знаками. Если определение веса B было сделано по первому способу (без выкачивания воздуха) и если допустить $e_1 = e_2$, то приблизительно

$$P = C - A + e_2V.$$

Указанные выше способы нахождения веса пара или газа, помещающегося в сосуде, могут быть упрощены и сделаны более точными во многих случаях.

Чтобы не делать значительной поправки на взвешивание в воздухе, Реньо при определении плотностей газов употребил следующий способ. Берут два по возможности вполне одинаковых шара, приготовленных из одного стекла (чтобы поглощение влаги и сгуще. ия воздуха на поверхности было одинаково). Отверстие каждого шара вполне герметично заделывают [2] оправой с герметическим краном. Затем предва-

[1] Если непосредственным опытом (чрез поглощение исследуемого газа в реагенте, не поглощающем воздуха, или тому подобным способом) убедились, что в приборе оставался воздух, то необходимо определить его количество и ввести в формулы поправки. Положим, измерили оставшийся воздух при t° и h мм., тогда найдем его вес из объема по вышеприведенным формулам; этот вес должно вычесть из P при вычислении плотности искомого газа или пара, но при этом также необходимо уменьшить и величину V, означающую в основной формуле объем пара, потому что не вся емкость сосуда была наполнена паром, а часть воздухом. Зная температуру, давление и вес, легко найти, какой объем занимал оставшийся воздух и этот объем вычесть из V. Конечно, если возможно, должно избегать всех этих поправок.

[2] Чтоб узнать герметичность закрытия сосуда, его погружают в нагретую воду. Если есть отверстие, то сперва воздух будет выходить из него пузырьками, а потом в шар при охлаждении и взойдет вода.

рительно достигают равенства внешних объемов обоих шаров. Для этого их наполняют водою, привешивают снизу к чашкам весов и достигают одинакового веса, доливая или убавляя воду. Потом оба шара запирают и погружают в общую водяную ванну. Если шары равнообъемны, то равновесие не нарушится. Если же один шар меньше другого, то первый перетянет. Узнают недостающий до равновесия вес, а по нем и объем. Такого же объема приготовляют стеклянную трубку, запаянную и снабженную крючком. Эту трубочку прикрепляют к меньшему шару и вновь испытывают и меньший шар навсегда запирают герметически, предварительно уравняв (приблизительно) в весе с другим шаром. Теперь мы имеем два снаружи равнообъемных шара, вытесняющих, следовательно, одинаковые объемы воздуха. Тогда из бо́льшего шара выкачивают воздух, определяют давление h оставшегося воздуха и его температуру (лучше если бы при выкачивании шар был помещен в тающий лед, что и принято при следующих за сим формулах) и привешивают к одной чашке весов, к другой же привешивают меньший шар с добавочною запаянною трубочкою. Оба шара помещают в особом хорошо закрытом (чтобы не было движения воздуха и перемены температуры) ящике, устроенном под весами, оставляют некоторое время и взвешивают. Придется положить небольшой груз E (предполагаем) на другую чашку. Очевидно, что истинный вес бо́льшего шара B найдется из уравнения:

$$B + \frac{h \cdot 001293}{760} - e_1 M = F + E - e_1 \left(M + \frac{E}{a}\right);$$

откуда

$$B = F + E - \frac{e_1}{a} E - \frac{h \cdot 0{,}001293}{760},$$

где F есть истинный вес второго шара (он далее уничтожится), M есть наружный объем обоих шаров (также уничтожится, а потому определять не нужно), a есть уд. вес гирь и e_1 есть вес одного куб. сантиметра воздуха. Затем наполняют шар газом (или паром) и вновь подвешивают к весам. Находят кажущийся вес G, какой нужно положить на другую чашку весов, к которой привешен второй шар. Истинный вес первого шара H с газом найдется из равенства:

$$H - e_2 M = F + G - e_2 \left(M + \frac{G}{a}\right);$$

откуда

$$H = F + G - e_2 \frac{G}{a},$$

а потому вес помещающегося газа

$$P = H - B = G + e_2 \frac{G}{a} - E + e_1 \frac{E}{a} + \frac{h \cdot 0{,}001293}{760}.$$

$$P = G - E + \frac{h \cdot 0{,}001293}{760} + \frac{e_2 G - e_1 E}{a}.$$

Последний член весьма мал, потому что величины e_1, e_2, G и E малы, а величина a (удельный вес гирь) велика, потому для определения его

можно довольствоваться грубыми определениями величин e_1 и e_2, что и составляет главную выгоду этого способа, при предыдущих способах и e_2 входит умноженным на V — величину значительную, а потому их требуется знать с точностью.

Во многих случаях величину P можно определить прямым анализом, переведя весь газ или пар, заключающийся в определенном объеме, в состояние, удобное для анализа, например, поглотив реагентом. Выгоды этого способа состоят в том, что избегается прямое взвешивание газа и есть возможность брать большие количества газа. Невыгоды состоят: в необходимости брать значительную массу газа, что затрудняет доведение его до определенной температуры и притом самый точный анализ не может сравниться в точности с прямым взвешиванием. Очевидно из этого, что этот способ должно употреблять или тогда, когда нельзя употребить других способов, или тогда, когда есть очень простые и точные способы анализа данного вещества. Так его можно применять к определению плотности кислых газов (CO^2, SO^2, HCl и т. п.), поглощая их щелочью, взятою в определенном количестве, и определяя или количество поглощенной кислоты, или количество оставшейся щелочи. Вообще такие вещества, как хлор, хлорангидриды кислот, металлические летучие соединения и тела легко и на-чисто реагирующие, представляют случай для применения этого способа. Поступать при этом можно следующим образом: в большой шар с краном вводят стеклянную запаянную трубочку, заключающую определенное количество реагента, и шар наполняют газом, измеряют температуру и давление, запирают кран и встряхиванием разбивают трубочку с реагентом. Газ поглощается. Спустя некоторое время кран шара сообщают с трубкою для поглощения углекислоты и отворяют, — входит воздух и тогда вымывают из шара реагент и обыкновенными (или титрованными) способами определяют его количество. Этот способ определения веса P мало применим к газовым смесям и к парам.

Для определения плотности паров существует другой способ нахождения величины P, при котором избегают взвешиваний сосуда с паром, а именно — берут определенное количество жидкости, плотность пара которой хотят определить и вводят ее в колокол, деленный на кубические сантиметры и наполненный ртутью. Тогда колокол доводят до температуры высшей, чем температура кипения исследуемой жидкости, жидкость испаряется и пар занимает определенный объем, который и замечают по числу делений колокола. Здесь, следовательно, взвешивается твердое тело или жидкость. Жидкость помещают в такой шарик, как при анализе жидких органических соединений. Сперва взвешивают пустой шарик, получают вес p_1, а потом шарик с жидкостью (запаянный, если жидкость очень летуча) и получают вес p_2. Можно принять, что

$$P = p_2 - p_1;$$

потому что поправка на взвешивание в воздухе весьма мала; если же для точного определения требуется ввести эту поправку, то вес одного кубического сантиметра воздуха e_1 определяется только раз, потому

что оба взвешивания следуют скоро одно за другим. Если означим чрез d удельный вес исследуемой жидкости (его достаточно знать приближенно), чрез a удельный вес гирек и чрез b — стекла, то, пренебрегая ничтожными величинами, будем иметь:

$$P = p_2 + e_1\left[\frac{p_2 - p_1}{d} + \frac{p_1}{b} - \frac{p_2}{a}\right] - p_1 - e_1\left[\frac{p_1}{b} - \frac{p_1}{a}\right];$$

или

$$P = (p_2 - p_1)\left[1 + e_1\left(\frac{1}{d} - \frac{1}{a}\right)\right].$$

В описании способов определения плотностей мы еще раз будем иметь случай возвратиться к указанию способов определения веса P при разных методах определения.

2) Объем V, занимаемый паром или газом, выраженный в кубических сантиметрах. Этот объем измеряется или трубками, деленными на части, или сосудами определенной вместимости. Во всяком случае обыкновенно берутся стеклянные сосуды, которых вместимость до или после опыта определяется через наполнение ртутью (при малых сосудах) или водою и чрез определение веса ртути или воды, помещающейся в сосуде при определенной температуре. Так как при опыте пар или газ помещается в сосуде при температуре t, а во время определения ёмкости сосуд имеет другую температуру t_1, то должно сделать поправку на расширение стекла (или вообще того вещества, из которого сделан сосуд). Эта поправка производится весьма просто. Если чрез v_1 означим ёмкость сосуда при температуре t_1, то при температуре t ёмкость сосуда будет:

$$v = v_1[1 + 0{,}000027(t - t_1)],$$

где 0,000027 есть коэффициент кубического расширения стекла. Этот коэффициент не постоянен для разных сортов стекла, но для обыкновенных способов определения, сопряженных с другими более значительными погрешностями, его можно признать постоянным. Для точнейших определений необходимо особыми приемами определить для данного стекла коэффициент его расширения. Для определения емкости сосуда, деленного на части, должно употреблять те способы, которые даны были ранее для калибрирования бюреток и эвдиометров (стр. 17 и 242)[1].

Для определения же вместимости сосудов, наполняемых газом или паром вполне, должно поступать таким образом. Такой сосуд очищают и высушивают[2], дают ему время принять температуру окружающего воздуха и тогда взвешивают. Найденный вес не исправляют на взве-

---

[1] [Ссылки в этой статье на страницы относятся к книге «Аналитическая химия», из которой взята настоящая статья Менделеева, но в тех случаях, когда эти страницы перепечатаны, здесь далее ставится знак равенства и страница настоящего тома. *Прим. ред.*].

[2] Для этого его сперва промывают слабою щелочью, потом слабою азотною кислотою, потом чистою водою, крепким спиртом и, наконец, сухим эфиром, нагревают, вытягивают воздух, вновь нагревают и охлаждают и т. д., пока не слышно будет запаха эфира и по охлаждении на внутренних стенках не будет заметно капелек или пота.

шивание в воздухе. Затем сосуд наполняют доверху чистою водою. Если отверстие сосуда узко и воду нельзя влить вытянутою воронкою, то сосуд нагревают и опускают отверстием в воду, потом воду, взошедшую при охлаждении, кипятят, чтобы выгнать парами весь воздух и тогда, при охлаждении, вода наполняет сосуд вполне. Если остались пузырьки воздуха, их должно удалить кипячением и заместить водою. Сосуд с водою погружают потом в ванну с постоянною (обыкновенною) температурою и ждут, пока вода сосуда не примет температуры ванны, что замечается по постоянству температуры самой ванны. Лучше, если температура ванны будет немного выше температуры воздуха, потому что тогда при обтирании и взвешивании вода не выльется из сосуда. Температуру ванны нужно заметить, сосуд вытереть снаружи насухо и взвесить. Вычитая вес пустого сосуда, найдем кажущийся вес вмещающейся при известной температуре воды. Этот вес должно исправить на взвешивание в воздухе, для чего достаточно хорошо поступать следующим образом: при взвешивании должно заметить температуру и давление воздуха, по ним найдется (из таблиц, приложенных в конце) вес одного кубического сантиметра влажного воздуха; этот вес должно помножить на 0,88[1] и на вес воды; произведение даст исправленный вес воды, вмещающейся в сосуд. По этому весу отыскиваем объем, руководствуясь таблицею удельных весов и объема воды, приложенною в конце книги. Если исправленный вес воды $= P$ и по таблице найдем, что при температуре (ванны) вода имеет удельный вес (вода при $4° = 1$) $= d$, то объем воды, а следовательно и сосуда $= \frac{P}{d}$.

Можно также измерять сосуды ртутью, наполнив его до краев и перелив потом ртуть в разделенную на кубические сантиметры и калиброванную трубку; но такой способ менее точен.

3) Далее для определения плотности пара или газа, как видно из формулы, необходимо точно знать температуру пара или газа. Для газов лучше всего брать температуру тающего льда, потому что она постоянна и тогда никаких поправок не нужно. Или же берут ванну с большим количеством воды, взятой при обыкновенной температуре, и в нее помещают сосуд с газом, наблюдая температуру ванны, когда газ примет ее, и тогда по температуре ванны судят о температуре газа. Чтобы судить о том, что газ принял температуру ванны, достаточно знать, изменяется или нет объем или давление газа, что легко узнать, приведя сосуд с газом в сообщение с манометром или погружая отверстие сосуда в жидкость. Если дело идет о парах, то необходимо употреблять ванны различной температуры, которые притом, очевидно, должны быть выше температуры кипения жидкости, плотность паров которой определяется. Для этой цели, как увидим впоследствии, употребляют водяные, соляные, масляные, металлические, воздушные и

[1] В точности должно было бы помножить на разность объемов воды и гири, т. е. на $V - \frac{P}{\Delta}$, где V есть объем воды, p — ее вес и Δ — уд. вес гири; но V близко к p, а Δ равно около 8,5, потому $V - \frac{P}{\Delta}$ можно принять равным $p\left(1 - \frac{1}{8,5}\right) = p\ 0,88$.

паровые ванны. Главное условие при этом есть постоянство температуры ванны и верное определение температуры. Здесь мы коснемся только последнего. Когда дело идет о довольно точном определении температур, то необходимо, чтобы не впасть в ошибки, иметь строго проверенные термометры и сделать в показаниях термометра все необходимые поправки. Но так как в химической практике не требуется, да иногда и невозможно (по невозможности иметь постоянные ванны) достигнуть особой, возможной однако в других случаях точности, то мы и укажем здесь способ проверки термометров и поправки их показаний до той степени точности, какая обыкновенно достаточна в пределах других погрешностей опыта. Полагаться же на прямое показание и простое отчитывание обыкновенного термометра никогда не должно, потому что это может повлечь за собой весьма грубые ошибки, достигающие, даже в термометрах весьма хорошо устроенных, до 10—20° Ц.

Выбирая термометр, должно наблюдать только три главных условия: 1) чтобы нить ртути не была разорвана и не разрывалась при переменном охлаждении и нагревании, и чтобы она легко соединялась с остальною ртутью после отрыва при слабом ударе или сотрясении; 2) чтобы трубочки термометра были снаружи цилиндричны или в виде сходящегося вниз конуса, что необходимо для удобства вправливания термометра в пробки и другие отверстия и 3) чтобы деления были равны между собою [1]. Конечно хорошо, если трубочка термометра представляет по возможности одинакий внутренний диаметр; но в совершенстве этого не достигает ни один термометр, а обыкновенные в продаже химические термометры представляют трубки достаточно порядочного выбора.

Прежде всего необходимо калибровать термометр, назначенный для опытов. Опишем простой способ калибрования готового термометра, имеющего довольно правильную трубку, то есть не имеющую ни особых вздутий, ни пузырьков, ни резких сьуживаний, что узнается по постоянству длины оторванной нити [2] Сперва отрывают ртутный столбик длиною менее одной тридцатой доли всего термометра, то-есть, при термометре до 300°, не более 10°. Длину этого столбика определяют, проводя его от низу вверх. причем замечают, какому градусу соответствует средина столбика. Для передвижения столбика необходимо сообщать термометру легкие удары, а для измерения длины столбика класть термометр горизонтально, отчитывать число градусов по обоим концам столбика и вычитать оба показания. Самое отчитывание необходимо делать, чтобы избежать ошибки от параллакса,

[1] Я не говорю здесь ни слова о термометрах с неравномерными по длине делениями, которые соответствуют одинаковым ёмкостям, потому что такие термометры необходимо делать самому, да они при выполнении представляют весьма большие трудности.

[2] В этом отношении термометры по методу Гейслера представляют больше гарантий, чем обыкновенные с толстыми трубками. Гейслеровские термометры состоят из тонкой трубки, вставленной рядом с деленною стеклянною [в подлиннике очевидная опечатка «стклянкою». *Прим. ред.*] пластинкою в другую, более широкую трубку. Их выгода, кроме того, еще состоит в уменьшении параллактической погрешности.

смотря прямо сверху, лучше чрез лупу или вертикально поставленный слабый микроскоп. Чем больше сделать таких отчитываний, тем лучше. Еще лучше повторить ту же операцию еще раз и взять среднее. Таким образом найдем, например, что при 0° столбик имеет длину [1] 9°,8, при 7° длину 9°,9, при 15° длину 10°,0, при 22° длину 9,9, при 29° длину 9,9 и т. д. вообще при a длина b, при a^1 длина b^1, при a^2 длина b^2 и т. д. Принимаем ёмкость одного градусного деления при $n°$ за 1 [2], тогда найдем, что ёмкость a одного градусного деления при $a = \frac{b^n}{b}$, при $a^1 = \frac{b^n}{b^1}$, при $a^2 = \frac{b^n}{b^2}$ и т. д. Если за единицу было избрано такое положение, при котором столбик имеет наибольшую длину, то все эти дроби будут больше единицы. Они будут немногим больше единицы, если трубка довольно правильна. Положим, что при a ёмкость одного деления $= 1 + c$, при $a^1 = 1 + c^1$, при $a^2 = 1 + c^2$ и т. д. Очевидно, что при a она $= 1$ и что $1 + c = \frac{b^n}{b}$, что $1 + c^1 = \frac{b^n}{b^1}$ и т. д., а потому $c = \frac{b^n}{b} - 1$; $c^1 = \frac{b^n}{b^1} - 1$, и т. д. Таким образом узнаем отношение ёмкостей градусных делений по всей трубке и составим первую необходимую таблицу. Для примера привожу числа:

									Среднее
При	0°	ёмкость	одного	градусного	деления	1,020;	d =	20	
»	7°	»	»	»	»	1,052;	»	52	36
»	15°	»	»	»	»	1,070;	»	70	61
»	23°	»	»	»	»	1,041;	»	41	55
»	26°	»	»	»	»	1,037;	»	37	39
»	35°	»	»	»	»	1,000;	»	0	19
»	40°	»	»	»	»	1,010;	»	10	5
»	45°	»	»	»	»	1,028;	»	28	19
»	54°	»	»	»	»	1,060;	»	60	44
»	60	»	»	»	»	1,081;	»	81	70
»	63°	»	»	»	»	1,075;	»	75	78
»	68°	»	»	»	»	1,072;	»	72	74

[1] Значит один конец при —4°,9, а другой при +4,9.

[2] Для удобства вычисления избирают такое положение, при котором длина столбика наибольшая, то-есть ёмкость одного градусного деления наименьшая.

								Среднее
При	70°	ёмкость	одного	градусного	деления	1,065;	d = 65	68
»	71°	»	»	»	»	1,063;	» 63	64
»	78°	»	»	»	»	1,050;	» 50	57
»	81°	»	»	»	»	1,042;	» 42	46
»	85°	»	»	»	»	1,030;	» 30	36
»	90°	»	»	»	»	1,021;	» 21	25
»	96°	»	»	»	»	1,013;	» 13	17
»	101°	»	»	»	»	1,007;	» 7	8

Не продолжаем таблицы, потому что и этих чисел совершенно достаточно. Для примера мы дали числам значения бо́льшие, чем те, какие бывают в действительности, чтобы яснее и проще были вычисления, за сим следующие. В последних столбцах даны значения c, увеличенные в 1000 раз; чтобы иметь дело с целыми числами, их назовем мы чрез d, следовательно $d = 1000\ c$.

Определим теперь положение 0° и 100°, потому сперва погружаем в тающий лед, потом в пары кипящей воды и замечаем давление. Положим, найдем, что в тающем льде показание термометра $= +0{,}5$, а в парах воды 98°,7 при 752 миллиметрах исправленного (на температуру ртути) давления. По таблицам находим, что при 753 миллиметрах температура кипения воды есть 99°,7; следовательно, 100° будут соответствовать на термометре 99°,0 (99,7 + 0,3 соответствуют 98,7 + 0,3), а 0° соответствует 0,5; пространство между ними, то-есть от 0,5 до 99,0 должно разделить на 100 равнообъемных частей —это и будут истинные градусы. Чтобы найти их положение, узнаем сперва, скольким градусам, принятым за единицу, соответствует расстояние от +0,5 до + 99°. Это легко узнать из предыдущей таблицы, если допустить, что от a^1 до a^2, от a^2 до a^3 и т. д., трубка представляет такую фигуру, что средний градус представляет среднюю ёмкость. Сосчитаем же ёмкость от 0,5 до 99°.

Один градус при 0° представляет ёмкость, для которой $d = 20$, при 7° же 52; следовательно, при 3,5 ёмкость 36, при $0 + k$ ёмкость $20 + k \cdot 4{,}7$, а потому при 0,5 ёмкость 22 (отбрасывая доли целых); в пространстве от 0,5 до 7° средняя ёмкость $\frac{22+52}{2}$ есть 37. Следовательно, для всех градусов от 0,5 до 7°, то есть на длине 6,5, вся сумма $d = 37 \times 6{,}5 = 241$, потому $c = 0{,}241$, а ёмкость всех градусов

от 0,5 до 7° термом. = 6,5 + 0,241 в дол. ёмк. 1° при a^n

Точно так же найдем:

от	7	до	15	термом.	8,0 + 0,488	»	»	»	»	»
»	15	»	23	»	8,0 + 0,440	»	»	»	»	»
»	23	»	26	»	3,0 + 0,097	»	»	»	»	»
»	26	»	35	»	9,0 + 0,171	»	»	»	»	»
»	35	»	40	»	5,0 + 0,025	»	»	»	»	»
»	40	»	45	»	5,0 + 0,095	»	»	»	»	»
»	45	»	54	»	9,0 + 0,396	»	»	»	»	»
»	54	»	60	»	6,0 + 0,420	»	»	»	»	»
»	60	»	63	»	3,0 + 0,234	»	»	»	»	»
»	63	»	68	»	5,0 + 0,370	»	»	»	»	»
»	68	»	70	»	2,0 + 0,136	»	»	»	»	»
»	70	»	71	»	1,0 + 0,064	»	»	»	»	»
»	71	»	78	»	7,0 + 0,399	»	»	»	»	»
»	78	»	81	»	3,0 + 0,138	»	»	»	»	»
»	81	»	85	»	4,0 + 0,144	»	»	»	»	»
»	85	»	90	»	5,0 + 0,125	»	»	»	»	»
»	90	»	96	»	6,0 + 0,102	»	»	»	»	»
»	96	»	99	»	3,0 + 0,024	»	»	»	»	»
					4,109	»	»	»	»	»
Складывая		все,		находим	98,5 + 4,1 = 102,6			»	»	»

Следовательно, если бы все градусы имели такую ёмкость, как при 35°, то от истинного 0° до истинных 100° помещалось бы 102,6 градусов; следовательно, каждый истинный градус имел бы ёмкость, равную 1,026 таких градусов, как при 35° (при a^n). Следовательно, если истинный 0° находится при + 0,5, то истинные 10° должны находиться при точке, которой ёмкость, начиная от 0,5 шкалы, = 10,26 градусов термометра.

От 0 до 7° ёмкость = 6,74, следовательно, еще недостает 3,52; а так как средняя ёмкость от 7 до 11° на термометре равна (52 при 7° и 61 при 11°) 56, то для 3,52 градусов нужно взять на термометр $\frac{3,52}{1,056}$, то-есть 3,33 градусных делений, а потому ёмкость в 10,26 таких градусов, как при 35°, придется в пространстве от 0,5 до 7 + 3,33; следовательно, при 10°,33 термометрической шкалы. Эти 10°,33, будут, следовательно, соответствовать истинным 10° Ц. Для определения положения точки, соответствующей истинным 20° Ц, поступим точно так же. От 10,33 до 15 шкалы ёмкость равна 8,488 — 3,52 = 4,97, от 15 до 20 средняя ёмкость = 1,061; следовательно, ёмкость 10,26 — 4,97 нужно взять $\frac{5,29}{1,061}$ или 5°,00; следовательно, 20-ти истинным градусам будет соответствовать точка 20°,00, также найдем и дальше.

Истинному	0	соответствует	на	шкале	+ 0°,50
»	10	»	»	»	10,33
»	20	»	»	»	20,00
»	30	»	»	»	29,93
»	40	»	»	»	40,07
»	50	»	»	»	50,01
»	100°	»	»	»	99,00

Таким образом определяется поправка, какую должно вносить в показания нашего термометра. Второй столбец показывает градусы, видимые на термометре, а первый истинные, а потому, чтобы получить из видимых градусов истинные, необходимо придать им следующую поправку:

при 0°	должно к читаемому числу градусов для получения истинных градусов Цельзия прибавить:	−0,5
» 10°		−0,3
» 20°		0,0
» 30°		+0,1
» 40°		−0,1
» 50°		0,0
» 100°		+1,0*

В этой поправке заключается поправка и на положение 0°, и на калибер трубки. Следовательно, если температура ванны по нашему термометру = 12°,7, то истинная ее температура будет 12,7 — 0,2 = 12°,5 Ц.

Известно, что положение 0° изменяется со временем, а потому полезно иметь поправку, независимую от перемещения этой точки. Ее легко найти, зная что при предыдущих вычислениях 0° приходился при + 0,5, а потому без поправки на положение 0° поправка на калибер и деления трубки будет следующая:

при 0°	0,0	при 40°	+0,4
» 10°	+0,2	» 50°	+0,5
» 20°	+0,5	» 100°	+0,2
» 30°	+0,6		

Следовательно, если бы со временем точка таяния льда переместилась в + 1,7, то поправка была бы следующая:

при 0°	—1,7	при 40°	1,3
» 10°	-1,5	» 50°	—1,2
» 20°	—1,2	» 100°	—0,2
» 30°	—1,1		

Таким образом каждое показание термометра должно быть исправлено на калибер и деления трубки и на положение 0°. Для этого при термометре необходимо иметь табличку поправок, составленную хотя бы вышеописанным способом, а так же необходимо время от времени определять перемещение 0°.

---

* [У Менделеева опечатка: напечатано + 9,0. *Прим. ред.*].

Вышеприведенный способ исправления не представляет полной точности, но близок к истине. Более точные поправки на калибер и положение постоянных точек весьма хлопотливы и сопряжены с некоторыми предположениями, в истине которых можно сомневаться. Если дело идет о температурах от 0° до 100°, то предыдущий способ дает довольно точную поправку, так что за термометр с $\frac{1}{10}$ градусными делениями можно ручаться за $\frac{1°}{10}$, для температур высоких, особенно от 180 до 300°, поправки очень сомнительны и нельзя ручаться уже за погрешность, меньшую $\frac{1}{2}$ и даже целого градуса, что показывает сличение показаний нескольких одинаково исправленных термометров. Это различие зависит от различия в составе и свойстве стекла, как показали исследования Реньо.

Истинные температуры (какие введены в формулы), как известно, относятся к воздушному термометру, а потому показания ртутного термометра должны быть исправлены в этом отношении. До 100° показания обоих термометров одинаковы, но далее начинается различие.

Впрочем эту поправку вводить в показания термометров мы не советуем, потому что при разных термометрах она весьма различна, смотря по составу стекла, из которого сделан термометр. Гораздо важнее поправки другого рода, а именно на температуру ртутного столба. При отчитывании температуры, часть столба ртути обыкновенно находится вне той ванны, в которой определяется температура. Если весь термометр находится в ванне, тогда показания его в этом отношении не требуют поправки; но если часть его выставляется вне ванны, то необходимо сделать поправку, потому что, поместив весь термометр в ванну, мы получили бы другую температуру. Эта поправка находится очень просто.

Если термометр погружен в ванну, так что в ней заключены только нижние градусы термометра до $t°$ (то есть в средине пробки, в которую вправлен термометр, приходится $t°$) и если верхние части ртутного столба имеют среднюю температуру $s°$ (это есть температура воздуха, окружающего термометр в верхних его частях; она наблюдается, приставив другой термометр к средине верхней части термометра), то, когда термометр показывает T°, его истинное показание будет:

$$\text{истинная температура} = T + (T - t)\,(T - s)\cdot 0{,}000154$$
$$\text{видимой}$$

Приведем примеры. Мы хотим, например, определить положение точки, соответствующей температуре кипящей воды, и вправляем наш термометр в пробку и тубулатную реторту, так что в средине пробки находится 30° Ц, а в самой реторте (в парах) шарик и нижние градусы. Верхняя часть термометра находится в воздухе. Кипятим воду и ждем, пока столб ртути примет постоянное положение. Отчитываем 99°,2. Тогда берем другой термометр, помещаем его рядом с нашим так, чтобы шарик приходился при 70° (в средине между 30 и 100°), и дожидаем его

постоянного показания, положим оно 27°,3. Истинная температура водяного пара по нашему термометру будет:

$$99{,}2 + (99{,}2 - 30)(99{,}2 - 27{,}3) \cdot 0{,}000154 = 99{,}2 + 69{,}2 \times 71{,}9 \times 0{,}000154 = 99{,}2 + 0{,}77 = 99{,}97.$$

При определении плотности пара имели масляную ванну, термометр вправлен до t = 50°. показание термометра T = 270°, температура воздуха (около точки 110°) s = 40°, истинная температура ванны будет:

$$270 + 220 \times 230 \times 0{,}000154 = 270 + 7{,}79 \text{ или около } 278°.$$

Из этих примеров видно, сколь значительным поправкам должны подвергаться прямые показания термометров, чтобы получить по ним понятие о истинных температурах.

4) Наконец, при определении плотности паров и газов, необходимо знать, при каком давлении произведено измерение объема. Давление, которому подвергается газ или пар в открытом сосуде, равно атмосферному давлению; следовательно, определяется барометром. Удобнейшие барометры для подобных исследований суть те барометры, которые были описаны в статье об анализе газов, то-есть сифонные, с вытравленными миллиметрическими делениями на обеих ветвях.

Прямое показание барометра должно быть *всегда* исправлено на температуру ртути, потому что под барометрическим давлением подразумевается давление, измеренное высотою ртутного столба, имеющего температуру 0°. Если дано давление h при температуре ртути $t°$, то истинное, приведенное к 0° давление, равно H (предполагая, что шкала разделена при 0°).

$$H = \frac{h \cdot (1 + \alpha t)}{1 + kt}, \text{ или почти } = h\,[1 - (k - \alpha)\,t],$$

где α есть коэффициент линейного расширения шкалы, а k коэффициент кубического расширения ртути.

Величина α для стекла = 0,000009, k — от 0° до 30° = 0,000179, до 100° = 0,000181, до 200° k = 0,000184, до 300° k = 0,000187, для барометра, где температуры обыкновенные, можно, следовательно, принять, что

$$H = h\,(1 - 0{,}000170\,t).$$

Потому, если при 25° барометр показал 753,6 мм., то при 0° его показание (истинное барометрическое давление) будет

$$H = 753{,}6\,(1 - 0{,}00017 \times 25) = 750{,}4.$$

Чтобы не делать вычисления, в конце книги приведены таблицы поправки барометрической высоты к 0°. В первой вертикальной строке даны наблюденные высоты барометра, а в горизонтальных строках поправки (должно отнять) для 1°, 2° и т. д. до 10°. Если дано, например, давление 750,0 мм. при 18°, то поправка

для 10° = 1,28
для 8° = 1,03
для 18° = 2,31

следовательно, истинное давление будет:

$$\begin{array}{r} 750{,}0 \\ -\,2{,}3 \\ \hline 747{,}7 \text{ мм.} \end{array}$$

Если измерение объема газа или пара было произведено в закрытом сосуде, то такой сосуд должен быть или снабжен особым манометром, или погружен в жидкость своим отверстием, чтобы знать, на сколько давление газа превышает, или на сколько (обыкновенно) оно меньше давления атмосферы. Если для манометра или для ванны употреблена (как всегда и делается) ртуть, то высоту ртутного столба должно прибавить (если этот столб увеличивает давление атмосферы) или отнять (как обыкновенно, например, и в газовом анализе) от барометрического давления. Но прежде чем делать это, необходимо высоту ртутного столба исправить на температуру, как и высоту барометра, и тогда только вычесть или прибавить.

Таким образом в формуле (стр. 301 = 15):

$$D = \frac{P}{V \frac{0{,}001293}{1 + 0{,}00366\,t} \cdot \frac{H}{760}}$$

каждая из входящих величин должна быть исправлена, — тогда только получится верное данное для плотности.

Предыдущую формулу можно упростить для вычисления, отыскать в таблицах значение $1 + 0{,}00366t$ (смотри конец книги). Означим эту величину через n. Тогда

$$D = \frac{P \cdot n \cdot 587\,780}{V \cdot H};$$

или в логарифмах:

$$\mathrm{LogD} = \mathrm{LogP} + \mathrm{Logn} + 5{,}76921 - \mathrm{LogV} - \mathrm{LogH}.$$

Этим способом проще всего и скорее идет вычисление. Должно только не забывать, что все величины надобно брать исправленными.

Прежде чем окончить этот отдел, считаем необходимым сделать еще несколько общих замечаний, относящихся до определения плотностей газов и паров.

1) Если дело идет о каком-либо химическом соединении или о данной смеси известных химических соединений, то обыкновенно необходимо выделить из газа или жидкости, превращаемой в пары, всю влажность и все те подмеси, которые не должно принимать в расчет, потому что они занимают известный объем и изменяют вес, — результат выходит зависимым от случайных причин. Если известную подмесь нельзя почему либо выделить и она будет в смеси, то нужно знать плотность ее пара и ее количество и потом, по закону плотностей смеси, вычислить плотность искомого вещества. Это относится и до подмеси воздуха, который часто остается, хотя и в малых количествах, в сосудах, употребляемых для определений. Особенно часто это случается при определении

плотностей паров жидкостей, в сосудах определенной ёмкости. Тогда необходимо узнать, сколько осталось воздуха. Для этого сосуд (закрытый краном или запаянный) открывают, опустив концом в ртуть. Ртуть входит в сосуд и наполняет его вполне, если не было воздуха, или не вполне, если оставался воздух. В последнем случае должно поступать так: сосуд ставят в вертикальное положение и дают ему принять температуру воздуха. Потом в сосуде измеряют высоту ртути над уровнем ее в ванне. Это измерение можно сделать приближенно, если осталось мало воздуха. Положим, что эта высота $= h$. Замечают далее температуру ртути или воздуха $t°$, и давление барометра H_1. Воздух, оставшийся в приборе, находился под давлением $H_1 - h$ при температуре t_1. Нужно узнать его объем. Для этого, не трогая сосуда, запирают его нижнее отверстие краном (конечно стальным, если такой приделан к сосуду — медный для этого не годится — при нем должно брать воду, но это менее точно) или пальцем (если край ровный и отверстие не велико), или (если отверстие неровно) надевают на него каучуковую трубочку, которую под ртутью и зажимают пальцем сколь возможно ближе к стеклу. К последнему способу должно прибегать в крайнем случае, потому что он наименее точен. Когда сосуд заперт, его вынимают из ванны и опрокидывают. Открыв сосуд, в него вливают из тонкой трубочки ртути до верху и узнают вес прилитой ртути, а потому и объем[1] остававшегося воздуха. Проще же поступают так: из верной бюретки приливают воду до верху и замечают число прилитых куб. сантиметров воды. Одним словом находят объем V_1, какой не наполнился жидкостью (занимает воздух) при температуре t_1 и давлении $H_1 - h$. В этом объеме воздуха заключались еще пары исследуемой жидкости [2]. Чтобы сделать поправку на это количество, необходимо знать давление паров жидкости h_1 при температуре t_1. Оно известно для нескольких жидкостей. Если же оно неизвестно, то приблизительно его можно вычислить для жидкостей с низкою температурою кипения (до 60°) по выражению:

$$h_1 = 760 - (t_2 - t_1)\ 27,$$

где t_2 есть температура кипения жидкости. Если жидкость имеет высокую температуру кипения, то этою поправкою можно пренебречь. Итак объем воздуха при t_1 и давлении $H_1 - h - h_1$ будет V_1. По этим данным найдем объем при температуре наблюдения t и давлении H.

При 0° и при 760 [мм.] этот объем равен

$$V_0 = \frac{V_1\ (H_1 - h - h_1)}{760\ (1 + 0{,}00367\ t_1)};$$

при температуре t и давлении H этот объем будет:

$$V_2 = \frac{V_0 \cdot (1 + 0{,}00367\ t)\ 760}{H};$$

---

[1] Разделяя вес ртути в граммах на 13,5 — частное = числу кубических сантиметров.

[2] Объем оставшейся жидкости взойдет в число объемов, занимаемых ртутью, а потому ртуть или воду должно приливать так, чтобы сгустившаяся жидкость не вылилась.

откуда объем, занимаемый воздухом при определении:

$$V_2 = V_1 \cdot \frac{H_1 - h - h_1}{H} \cdot \frac{1 + 0{,}00367\ t}{1 + 0{,}00367\ t_1} =$$

$$= V_1 \frac{H_1 - h - h_1}{H} \cdot \frac{n}{1 + 0{,}00367\ t_1}.$$

Вес этого воздуха $p_2 = \frac{V_2 \cdot 0{,}001293 \cdot H}{(1 + 0{,}00367\ t)\ 760} = \frac{V_2 H}{n \cdot 587\,780}$

$$p_2 = 0{,}001293 \cdot V_1 \cdot \frac{H_1 - h - h_1}{760} \cdot \frac{1 + 0{,}00367\ t}{1 + 0{,}00367\ t_1} =$$

$$= \frac{V_1 (H - h - h_1)\ n}{877\,805\ (1 + 0{,}00367\ t_1)},$$

где n имеет значение $= 1 + 0{,}00367\ t$.

Предположим, мы нашли при определении плотности, что при $t°$ и H мм. газ или пар, смешанный с воздухом, занимал объем V_3 и имел вес p_3. Очевидно, что самый газ или пар весит $p_3 — p_2$, а объем его был $V_3 — V_2$, а потому плотность газа или пара найдется по выражению:

$$D = \frac{(p_3 - p_2)\ n \cdot 587\,750}{(V_3 - V_2)\ H},$$

где p_3 и V_3 даны по общим методам, а p_2 и V_2 вычисляются по вышеприведенным формулам.

2) При определении плотностей пара жидких и твердых тел необходимо избирать такую температуру $t°$, которая по крайней мере на 20°—30°, лучше, если возможно, на 40°—50° выше температуры кипения. Но эта температура $t°$ не должна достигать температуры разложения сложного тела. Для некоторых тел потому и невозможно определить с точностью плотность пара, что этот предел очень узок. Необходимость не достигать предела разложения столь очевидна, что об этом нет нужды и распространяться. Необходимость же брать температуру, превышающую кипение на несколько десятков градусов, видна из того, что около самой температуры кипения пары, насыщающие или почти насыщающие пространство, имеют другой коэффициент расширения, чем воздух и другие газы, а потому *плотность* паров при этих температурах изменчива, что особенно ясно видно из исследований Кагура над плотностью паров уксусной кислоты, кипящей при 117°. Плотность эта от 117 до 200° постоянно меняется и только около 230 достигает до той плотности, какая остается постоянною и какая близка к теоретической плотности паров уксусной кислоты. Очевидно из этого, что для наибольшей верности необходимо сделать по крайней мере два определения плотности, если имеем дело с неизвестным или мало исследованным веществом: одно, например, при температуре Т +40°, а другое при Т +80°, где Т означает температуру кипения. Если плотность пара при этом не меняется, то ее можно принять, как постоянную, иначе должно сделать еще два определения при высших температурах.

3) При определении плотностей паров и газов должно обратить особенное внимание на равномерность температуры того пространства

(ванны), в котором помещен сосуд с газом и на то, чтобы эти температуры при определении объема не менялись. Постоянство температуры при употреблении колоколов и ртутных ванн легко заметить по неизменности уровня ртути в колоколе. Если же сосуд открыть, то повышение температуры (конечно довольно значительное только) можно заметить по выхождению пара или газа из тонкого отверстия сосуда, и понижение по вхождению воздуха в сосуд. Различные способы определения плотностей, особенно паров, характеризуются, между прочим, теми способами, какими достигают по возможности равномерных температур. Особенные приемы определения плотностей при высоких температурах (выше кипения ртути и особенно выше температуры размягчения стекла) мы не станем описывать, потому что они не имеют до сих пор значения для анализа.

4) Приемы для определения плотностей, очевидно, должно соображать с свойствами определяемых тел. Так, например, многие тела изменяются от воздуха, ими должно наполнять сосуды, из которых выкачан воздух и потом изгнан остаток не действующим газом.

III. Приемы для определения плотностей газов [1]

Главную особенность в определении плотностей газов (относительно паров) составляет возможность определения объемов при обыкновенных и низких температурах. От этого t определяется легко, для величины V можно избежать поправки на расширение стекла, и величина P определяется точнее, потому что можно брать большие шары с кранами и потому что при низших температурах в известном объеме вмещается более газа. Все эти условия делают точность определения плотности газов бо́льшею, чем для паров, при прочих равных обстоятельствах.

Исследуемый газ собирают в газометр, водяной, если газ не смешанный и не изменяется от воды, или ртутный (стр. 238); в других обстоятельствах (если газ действует и на ртуть (хлор), то его прямо приготовляют и из колбы или реторты проводят прямо в сосуд для взвешивания). Приготовляют также шар (или два шара, стр. 304 = 13), в который должно поместить газ. Высушенный шар сообщают с воздушным насосом и выкачивают воздух, потом впускают в прибор сухой воздух (просушенный через трубку с $CaCl^2$) и вновь выкачивают воздух. Тогда, заперев кран, сосуд взвешивают и по этому определяют вес пустого сосуда, как было описано. После того к газометру приставляют приборы для высушивания газа и, выпуская часть газа, наполняют им эти приборы. Последнее отверстие должно быть снабжено краном. Этот кран, ведущий к газометру, сообщают с входным краном воздушного насоса, а шар с тем краном воздушного насоса, чрез который

[1] В этом и следующем отделе мы рассмотрим обыкновеннейшие и особенно наиболее простые, сокращенные способы определения плотностей, обращая главное внимание на самые приемы определения. Соображаясь с данными, наблюдателю, конечно, придется часто изменять эти приемы, заимствовать от разных способов разные части, но предварительно должно ознакомиться с разнообразными приемами, чтобы их можно было комбинировать по произволу.

вытягивается воздух. Отворяя понемногу все краны, дают возможность газу проникнуть в шар. Этот проникший газ выкачивают и выпускают в воздух, чтобы увлечь весь воздух, оставшийся в шаре. Полезно повторить это еще раз, если имеется достаточно газа, чтобы выделить воздух. Когда в шаре осталось небольшое количество газа, шар помещают в тающий снег или лед, дают ему охладиться и, если возможно, еще раз выкачивают воздух, а потом напускают газ. Когда газ наполнит шар, то газу и шару дают вполне охладиться, а тогда близ газометра скрепление снимают и через две-три секунды закрывают кран, который подле шара. При этом замечают давление и исправляют его на температуру ртути. Тогда шар вынимают из ванны, дают ему принять температуру воздуха, обсушивают снаружи и ставят под весы. Взвешивают и вес исправляют на вес воздуха, вытесняемого шаром и гирями, а для того определяют температуру и давление барометра при взвешивании.

Для определения ёмкости шара, его наполняют чистою прокипяченною водою, охлажденною до 0°, оставляют в снеговой или ледяной ванне и, когда вода перестанет изменять объем, затворяют кран и вынимают всю поверх него находящуюся воду пропускною бумагою. Затем, отворив кран, высасывают часть воды из шара. Это делается посредством взвешенного тонкого стеклянного шарика с вытянутою трубочкою. Шарик предварительно нагревают и тогда отверстие трубочки вставляют в отверстие крана. Часть воды взойдет в шарик. Это делается для того, чтобы при нагревании до взвешивания не потерять часть воды от расширения ее. Тогда вынимают шар с водою из льда и дают ему принять обыкновенную температуру, потом взвешивают шар с водою вместе с добавочным шариком. При этом, сравнительно с точностью других данных, нет нужды особо определять вес одного кубического сантиметра воздуха, тем более, что взвешивание шара с водою обыкновенно приходится в лабораториях производить на грубых весах, не допускающих той точности, как для предыдущих взвешиваний. Можно почти безошибочно принять в этом случае тот же вес воздуха, как и при взвешивании газа.

Вычисление плотности при этом можно произвести по следующей формуле.

$$D = \frac{p_2 + e_2 (m - 0{,}12\ p_2) - p_1 + \frac{0{,}00129\ h_1}{760} - e_1 (m - 0{,}12\ p_1)}{\frac{(p_4 - p_3 - p_1)(1 + 0{,}88\ e_2)}{0{,}99988}\ 0{,}001293\ \frac{H}{760}},$$

где h_1 означает малое давление воздуха, оставшегося в шаре пред его взвешиванием.

p_1 — вес шара с разряженным воздухом.

e_1 — вес одного куб. сантиметра воздуха при этом взвешивании (об определении см. стр. 2991=4).

p_2 — вес шара, наполненного газом.

e_2 — вес одного куб. сантиметра воздуха при этом взвешивании.

p_3 — вес добавочного шарика.

p_4 — вес шара и шарика с водою.

$0{,}12 = \frac{1}{a}$, где a есть удельный вес гирек; $\frac{1}{a}$ для обыкновенных латунных гирь близко к 0,12.

$0{,}3 = \frac{1}{b}$, где b есть удельный вес материала шара.

0,99988 есть удельный вес воды при 0°.

$m = 0{,}3\ p_1 + p_4 - p_3 - p_1$ есть объем шара с наружной его оболочкой.

Составление этой формулы из всего прежде сказанного должно быть совершенно ясно. Производя еще далее возможные сокращения и упрощения, получим:

$$D = \frac{587\,780}{H}\left[\frac{p_2 - p_1 + \frac{h_1}{587\,780}}{p_4 - p_3 - p_1}(1 - 0{,}88\,e_2) + e_2 - e_1\right] 0{,}99988.$$

Если взвешивания p_1 и p_2 скоро следовали друг за другом и под весами температура не менялась, то можно принять $e_3 = e_1$. Принимая для e_2 среднее значение 0,0012, получим для $(1-0{,}88e_2)$ значение 0,998. и тогда вся формула может быть превращена в следующий простейший вид:

$$D = \frac{586\,600\,(p_2 - p_1) + h_1}{H\,(p_4 - p_3 - p_1)};$$

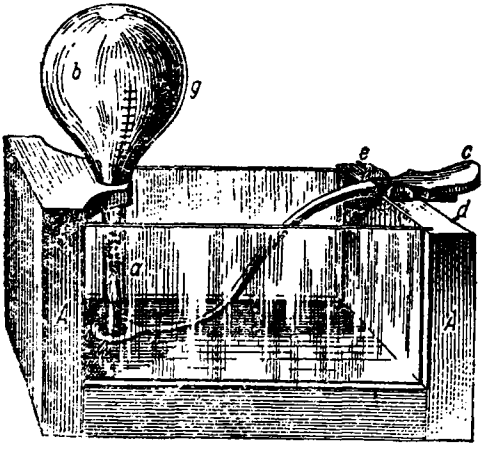
а потому можно довольствоваться 4-мя взвешиваниями (p_1 и p более точные, чем p_4 и p_3) и двумя определениями давления h_1 (по манометру воздушного насоса) и H (по барометру во время закрытия крана). Если воздушный насос хорош и h_1 незначительно (не более, например, 3 миллиметров при шаре ёмкостью в литр), то его значением можно пренебречь.

Чтобы иметь по возможности точный результат, необходимо брать шар довольно значительного объема, по крайней мере в один литр, а лучше в 5—6 литров. Для более грубых определений можно довольствоваться меньшею емкостью в 300 — даже в 200 куб. сантиметров, потому что количество воздуха, помещающееся в таком сосуде, весит около 0,35—0,25 грамма.

Видоизменение приемов для обыкновенной температуры (вместо 0°) столь понятно, что не требует и описания. Полезно только всегда определять ёмкость по весу воды той же температуры, которую имел и газ во время закрытия крана. Оставив в стороне описание этих подробностей, остановимся лучше на приемах скорейшего определения плотности газа, что очень часто приходится производить при ходе химических работ с газами. Требуется иметь приближенную плотность газа сколь возможно простейшими способами и притом, обыкновенно, количество газа ограничено. Для этого лучше всего употреблять (по Бунзену) колбу с узким и высоким горлом, ёмкостью в 200—300 куб. сантиметров. На горлышке колбы назначаются миллиметрические деления, и колба калибрируется или ртутью, или по весу помещающейся воды, как было описано ранее, так, чтобы зная деление, до которого помещается газ, мы знали и его объем. Горло колбы должно быть возможно

узко, отверстие не толще соломины или тонкого пера. В это отверстие пришлифовывается сколь возможно тщательнее (шмергелем и скипидаром) стеклянная пробка с плоскою головкой.

Пред определением плотности газа, в колбу вливают немного крепкого раствора хлористого кальция. Нагревая и охлаждая этот раствор в колбе и высасывая притом воздух (трубочкою) из колбы, легко достигают того, чтобы хлористый кальций кристаллизовался на стенке колбы (в виде пятнышка, означенного на фигуре буквою *b*). Затем колбу наполняют чрез длинную воронку чистою ртутью доверху, так, чтобы не осталось пузырьков воздуха и, закрыв пробкою, опускают, пробкою вниз, в малую ртутную ванну со стеклянными стенками, как изображено на фигуре 109. Тогда открывают под ртутью пробку и прикрепляют ее на кружке *f* посредством игл и воска или другим подобным способом. Кружок *f* находится на конце рычага *cf*, посредством которого можно закрыть горло колбы, не касаясь ее руками. Рычажок *cf* удерживают в положении, соответствующем открытой колбе посредством клинышка *d*. Когда колба и пробка укреплены, тогда чрез тонкую газоотводную трубку наполняют колбу газом. Если исследуется газ, выделяющийся при какой-либо реакции, то прямо его проводят в колбу, не употребляя высушивающих средств, чтобы не иметь подмеси воздуха, трудно вытесняемого из высушивающих аппаратов. Для высушивания же газа служит то количество хлористого кальция, которое выкристаллизовано на его стенке. Газ вводят до тех пор, пока уровень ртути внутри прибора не будет почти одинаковым с наружным уровнем. Затем всему снаряду дают на некоторое время совершенный покой, чтобы газ принял температуру *t* и давление H (исправленное на температуру ртути), которые и определяют по стоящим вблизи термометру и барометру, а также замечают и высоту ртутного столба в шейке колбы, то есть отчитывают (катетометром) разность уровней ртути внутри и вне колбы. Назовем ее чрез *h*. По калибру колбы, знают объем сосуда до той черты, до которой находится газ. Назовем этот объем V. Очевидно, что должно принять газ имеющим температуру *t*, давление H — *h* и объем V; требуется только знать вес P. Для этого сосуд закрывают пробкою, вынув клинышек *d* и надавливая на ручку *c*. Потом вынимают штифтик *e* и колбу вместе с пробкою[1] и рычагом осторожно подымают из ртути, очищают ртуть и



Фиг. 109.

[1] [В оригинале опечатка «пробою». *Прим. ред.*].

нечистоты около пробки и освобождают ее от кружка *f*. Тогда колбу опрокидывают и сосуд снаружи тщательно очищают и взвешивают, заметив при этом температуру и давление, для определения веса одного куб. сант. воздуха. Получают вес сосуда с газом (ртутью и хлористым кальцием) P_1 и вес одного куб. сант. воздуха e_1. Потом в пробку колбы вставляют пробку, соединенную с хлорокальциевою трубкою и воздушным насосом. Газ выкачивают, пропускают сухого воздуха и повторяют это, пока весь газ не будет заменен воздухом. Тогда вновь (но слабо) закрывают сосуд и взвешивают, оставив первоначально принять температуру весов. Находят вес пустого сосуда (с ртутью и $CaCl^2$) P_2. Вес газа (отбрасывая незначительные поправки), помещающегося в сосуде:

$$P = P_1 + e_1V - P_2$$

Поэтому

$$D = \frac{(P_1 + e_1V - P_2) \cdot (1 + 0{,}00367\ t)\ 587780}{V \cdot (H - h)}.$$

Приводим пример, из сочинения Бунзена, определения этим способом плотности бромистого метила, произведенного в маленькой колбе емкостью около 44 куб. сант. Наблюдения показали:

$V = 42{,}19$ куб. сантиметров.
$H = 746{,}4$ миллиметра.
$h = 24{,}3$ „ „
$t = 16{,}8°$ Цельсия.
$P_1 = 7{,}9465$ граммов.
$P_1 = 7{,}8397$ „ „

При взвешивании давление было = 742,1 мм. при температуре 6°,2 Ц., поэтому

$$e_1 = 0{,}00123.$$

$H - h$ по исправлении на температуру = 720,1

$$P = P_1 + e_1V - P_2 = 0{,}1587;$$

потому $D = 3{,}26$

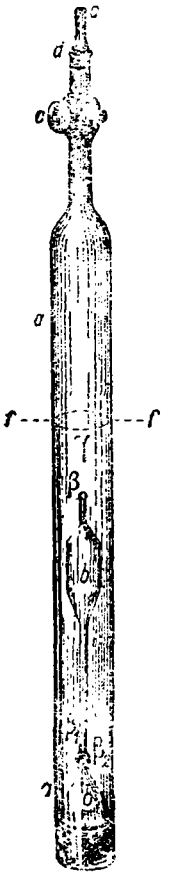
по химическому составу CH^3Br он должен быть около 3,30, следовательно, теория и результат опыта согласны между собою в пределах достаточной точности[1].

Иногда, особенно при теоретических химических исследованиях, в распоряжении наблюдателя имеется только несколько кубических сантиметров газа и требуется определить его природу и между прочим плотность. Тогда обыкновенные способы не приложимы. Для этих случаев Бунзен предложил следующий способ, основанный на законе времен истечения газов чрез отверстия в тонких пластинках. Этим путем можно довольно близко определить плотность, имея всего один или два куб. сантиметра газа.

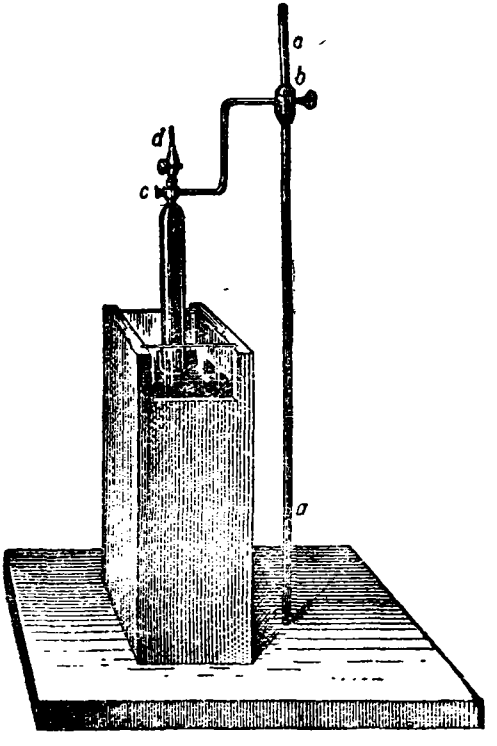
[1] Видоизменяя этот способ определения чрез помещение сосуда с газом в воду, наливаемую в ванну поверх ртути (подобно тому как в абсорбциометре), можно значительно ускорить определение и достигнуть большой точности.

Основанием этого способа служит тот закон, что удельные веса двух газов, вытекающих при одинаковых условиях чрез малое отверстие в тонкой пластинке, почти пропорциональны квадратам времен истечения равных объемов этих газов. Если данный объем воздуха (плотность = 1) истекает в течение t секунд, а другой газ, которого плотность = D, в течение T секунд, то

$$1 : D = t^2 : T^2,$$



Фиг. 110.



Фиг. 111.

откуда

$$D = \frac{T^2}{t^2}.$$

Следовательно, нужно только знать времена истечения из одного сосуда равных объемов газа и воздуха, чтобы знать плотность газа.

Прибор, для этого употребляемый, имеет устройство и расположение, изображенное на фигурах 110 и 111. Это есть стеклянный цилиндр ёмкостью около 70 куб. сантиметров (можно и гораздо менее). Посредине этого цилиндра aa проведена черта γ, до которой всегда цилиндр погружается в ртутную ванну (A на фиг. 111). Верхняя часть цилиндра снабжена стеклянным краном c, поверх которого вставляется пришли-

фованная тонкая с воронкой стеклянная трубочка d. В верхнем конце этой трубочки впаян тонкий платиновый листочек, в котором сделано тонкою иглою отверстие. Когда отверстие проколото, листок куют гладким молотом на шлифованной наковальне до тех пор, пока отверстие не будет едва видимо при помещении пластинки между глазом и сильным светом. Из этого-то отверстия и истекают газы, имеющиеся в колоколе. Чтобы для всех опытов расходовать одно и то же объемное количество газа и иметь притом одно и то же давление, в колокол помещают легкий вертикально-плавающий поплавок bb. К вершине этого поплавка приделана черного стекла маленькая головка β, поверх которой припаяна небольшая белая стеклянная ниточка. Черная головка составляет верхний значок, белая же нить служит только указателем близкого появления значка, что дает возможность наблюдателю своевременно заметить появление значка и начать счет секунд. Нижний значок есть β_2, поверх которого имеется предшествующий ему значок β_1: оба они обозначены припаянною черною стеклянною нитью. Если газ почти вполне наполняет колокол и он погружен в ртутную ванну до черты ff, изображающей уровень ртути, то при открытом кране, очевидно, будет происходить из колокола чрез пластинку e истечение газа.

При наблюдении трубою, направленною по поверхности ртути ff, сперва не видно поплавка (так помещена черта γ), потом появляется белая нить и за нею значок β. Тогда начинают счет секунд по хорошим секундным (полусекундным) часам, не переставая наблюдать в трубу. Когда появится значок β_1, счет не прекращают, а его оканчивают, когда покажется значок β_2. Число секунд, прошедших от появления β до появления β_2, и составляет искомое время истечения данного газа. Опыт для верности повторяют несколько раз. Чтобы наполнить колокол газом, открывают кран c и опускают (укрепив в стативе) колокол вполне в ртутную ванну, имеющую для этой цели в нижней (деревянной) своей части глубокую впадину. Когда ртуть взойдет до самого крана, кран запирают, колокол поднимают и в него впускают снизу, как делается обыкновенно, желаемый газ, пока верхний значок β не спрячется под уровень. Тогда устанавливают колокол, чтобы уровень был ровно при черте γ, и начинают наблюдение. Газы должно употреблять высушенные. Приводим примеры, показывающие степень точности подобных определений.

Воздух, помещенный в прибор, истекал в следующие времена:

105,5
105,0
105,5
105,6.

Водород в том же приборе требовал для своего истечения времени при четырех опытах:

29,7
30,0
29,5
29,3.

Квадраты последних чисел, деленные на соответствующие квадраты первых чисел, суть:

0,0792
0,0816
0,0782
0,0770.

Среднее отношение квадратов времени истечения равно 0,0790, истинная же плотность водорода = 0,069. Гремучий газ и воздух дали следующие числа:

Воздух t	Гремучий газ T	$^{o}t^{2}$	T^{2}	$\frac{T^{2}}{t^{2}}$
117,9	75,4	13,900	568,52	0,4090
117,0	75,5	13,689	570,03	0,4164
117,9	75,5	13,900	570,03	0,4101
117,6	75,6	13,830	571,54	0,4133

Истинная плотность гремучего газа = 0,415, а средняя плотность, судя по истечению, = 0,412.

IV. О приемах для определения плотности паров

Для определения плотности паров употребляют два способа: или берут сосуд определенного объема (дано V) и определяют вес пара, в него вмещающегося (отыскивается P) — это есть способ Дюма, подвергавшийся только некоторым незначительным изменениям, или же берется известный вес (дано P) твердого или жидкого вещества и измеряется объем (отыскивается V), который занимает данный вес пара. Этот последний способ дан Гэ-Люссаком [1]. В последнее время предложили много видоизменений практических приемов этого способа, чтобы сделать методу Гэ-Люссака, весьма изящную и допускающую скорость и точность определения, применимою к определению плотности паров тел, имеющих высокую температуру кипения, потому что в своем первоначальном виде способ Гэ-Люссака применим только к телам, кипящим раньше воды.

Мы опишем приемы способов Дюма и Гэ-Люссака и дадим способ вычисления по обоим способам плотностей, а потом предложим краткое описание видоизменений последнего способа.

Способ Дюма в сущности состоит в том, что в стеклянный шар известного веса и объема вводят достаточное количество исследуемой жидкости и его нагревают в ванне до температуры выше кипения жидкости. Образующиеся пары выгоняют воздух и наполняют шар. Тогда тонкое отверстие вытянутого горлышка шара запаивают, шар охлаждают и взвешивают. При запаивании замечают температуру ванны и высоту барометра. Полученные величины исправляют и вычисляют плотность.

Этот способ отличается от обыкновенного способа определения плотности газов в сущности только тем, что объем измеряется при высокой

[1] [Сохраняем правописание Менделеева, хотя впоследствии он сам писал «Гей-Люссак»,—см. далее, стр. 71 и следующие. *Прим. ред.*].

температуре. Общность и простота этого способа сделали его весьма распространенным. Большинство определений плотностей пара, произведенных до сих пор химиками, сделано по этому способу.

Для определения плотности пара по этому способу, берут стеклянные шары, емкостью от 200 до 500 куб. сант. Такие шары выдувают из стеклянных трубок пред сильным паяльным столом. Стенки шара должны быть довольно солидны.

Горлышко выдутого шара (часть трубки) должно иметь довольно толстые стенки, но в то же время должно и легко размягчаться, а потому не должно представлять большой толщины. Его обрезывают на расстоянии, равном диаметру шара и, вливая в него попеременно щелочи, кислоты, воду, спирт и эфир, вымывают чрез него внутренность шара. Потом его сушат, нагревая на лампе и высасывая тонкой вставленной трубочкой внутренний воздух или, что гораздо лучше и скорее, продувая чрез вставленную трубочку сухой воздух из паяльного меха. Когда шар высушен, горлышко его размягчают на паяльном столе и сперва оттягивают в тонкую, но крепкую трубочку (вращая шар около оси, общей с горлышком), а потом близ шара ее загибают под тупым углом. От этой трубочки свободный (неразмягчавшийся) конец отрезывают по самое узкое место, чтобы получить вытянутое горлышко, длиною достигающее или превышающее радиус той ванны, в которой производится нагревание. Это необходимо для удобства запаивания. Загнутая часть трубочки, как выдающаяся из ванны, должна иметь малую ширину отверстия, чтобы в ней вмещалось мало пара. Свободный конец ее должен быть ровно обрезан и иметь возможно малое отверстие, чтобы легко было его запаять. Фиг. 112-я изображает такой приготовленный шар.



Фиг. 112.

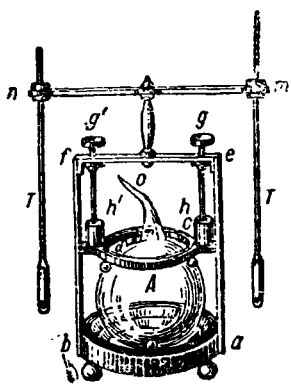
Когда шар приготовлен, его кладут под колпак весов на одну чашку и оставляют принять температуру весов. Чрез некоторое время взвешивают, причем замечают температуру весов и стояние барометра.

Для того чтобы влить в шар исследуемую жидкость, шар слабо нагревают и конец горлышка погружают в жидкость. При охлаждении [1] часть жидкости взойдет в шар. Смотря по природе жидкости, дают ей взойти различному количеству; во всяком случае в шар ёмкостью около 300 куб. сант. должно ввести не менее 5-ти граммов жидкости, чтобы можно было избытком ее в виде пара выгнать, по возможности, весь воздух. Тела твердые для наполнения осторожно сплавляют и горлышко слабо нагревают, чтобы вещество в нем не затвердевало.

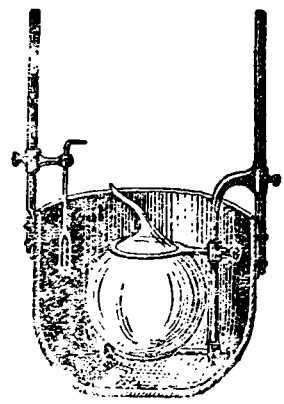
После этого шар укрепляют между двумя параллельными кольцами, чтобы поставить в ванны. Устройство колец видно на фиг. 113-й. Такой прибор состоит из рамки *abef*, прикрепленной к кольцу *ab*. На него ставится шар и потом кладется верхнее кольцо *c* и закрепляются винты *gg'*, действующие на пробки *hh'*, давящие на верхнее кольцо. Такой

[1] Иногда, особенно при очень летучих жидкостях, должно охлаждать шар, смачивая эфиром, иначе жидкость не входит.

прибор, снабженный двумя термометрами TT, может быть помещен в обыкновенный котел, служащий вместо ванны для нагревания. Ныне наиболее распространено другое, более простое устройство прибора (фиг. 114). К ручкам чугунного котелка (шпеньками) прикреплены два вертикальных железных прута, по которым скользят и могут закрепляться винтами поддержки. На одной из них, направленной вертикально вниз, приделаны два закрепляющиеся кольца для помещения шара, в другой же вправлен термометр. Во всяком случае кольца или нечто подобное необходимы для удержания легкого шара в жидкости, наполняющей ванну. Ванною служат котлы с жидкостями, способными нагреваться до желаемых температур, которые обыкновенно на 30—50° превышают температуры кипения определяемых жидкостей. Для тем-



Фиг. 113.



Фиг. 114.

ператур не выше 100° берут воду; для температур немного выше 100° — насыщенные растворы солей, особенно хлористого кальция; для высших температур глицерин, который можно употреблять до 200°; жидкие растительные масла, безопасные для температур не выше 200°, но иногда неприятные по отделяемому запаху; бычачье сало, могущее выдерживать температуру до 250°; для высших же температур берут легкоплавкий металлический сплав.

Берут столько жидкости в ванну, чтобы она покрывала весь шар и широкую часть горлышка. Подле шара помещают термометр, так чтобы шарик его приходился около средины шара. Ванну с шаром нагревают или на газовой лампе, или, как делается обыкновенно, на печурке с угольями. Когда температура ванны и шара достигает кипения жидкости, воздух и пары выходят из отверстия горлышка с большою силою. Если дорожат исследуемым веществом, то его пары можно сгустить, приставив к концу горлышка небольшой охладник. Когда быстрота тока паров уменьшится, то-есть когда избыток жидкости испарится, необходимо зорко следить за огнем, чтобы не произошло случайного охлаждения, потому что тогда в шар может проникнуть воздух. После быстрого выхода паров начинается, при постоянном воз-

растании температуры ванны, медленный выход пара, расширяющегося от нагревания. Тогда необходимо так направлять нагреванием, чтобы температура ванны повышалась очень медленно. При этом необходимо помешивать жидкость ванны, чтобы придать ей равномерную температуру. Таким образом мало по малу достигают желаемой температуры. Ее необходимо по возможности долго удерживать, чтобы пар принял температуру ванны. Для этого подкладывают новых углей, затворяют или уменьшают поддувала печи, выгребают сильно раскаленные угли и тому подобное и притом постоянно следят за температурою, и когда в течение одной — двух минут температура удержалась постоянною, ее замечают и запаивают отверстие горлышка. Для этого употребляют ручную лампочку и паяльную трубку, как описано в газовом анализе (ф. 78). Если исследуемое тело имеет высокую температуру кипения, то в выдающейся из ванны части горлышка обыкновенно сгущается часть жидкости. Тогда перед запаиванием должно к этой части горлышка поднести раскаленный уголь, чтобы улетучить жидкость. При запаивании необходимо накаливать только самый кончик горлышка и потому сперва получить правильное пламя, а потом приблизить его к отверстию.

После запаивания, не медля, должно произвести полное отчитывание термометра (и при нем 2-го термометра для поправки, стр. 317=28) и барометра (и при нем термометра, стр. 318=29).

После этого шар вынимают из ванны и, очистив его от жидкости ванны, дают ему охладиться до температуры окружающего воздуха. Потом обтирают, обмывают (если было в ванне сало или масло, то обмывают эфиром) и обсушивают шар с наружной поверхности и помещают его в ящик весов. Спустя некоторое время взвешивают, причем определяют и температуру воздуха в весах; состояние барометра при этом можно принять неизменившимся.

Теперь остается определить ёмкость сосуда и количество оставшегося воздуха, что и производится способами, описанными на стр. 308=21 и 320=31. Обыкновенно объем измеряют ртутью, отломив кончик горлышка под ртутью и измеряя количество ртути в градированном цилиндре. Количество воздуха при этом проще всего измерять, перевернув шар и доливая его водою или ртутью из небольшой разделенной пипетки. Если отломленный конец неровен, то для переворачивания шара, на кончик горлышка надевают (подведя в ртуть) кусочек каучуковой трубки и, защемив ее как можно ближе к стеклу, переворачивают шар. В более точных наблюдениях должно соблюдать при измерении объема и количества оставшегося воздуха все предосторожности, какие указаны нами ранее. Предполагаем, что ёмкость всего шара V, при обыкновенной температуре определена одним из способов, так же как и объем w воздуха, оставшегося в приборе.

По всем предыдущим определениям вычисление плотности можно произвести, пренебрегая некоторыми поправками. А именно:

1) Поправкою на вес гирь в воздухе, потому что в двух взвешиваниях вес воздуха почти одинаков и разность весов, которую требуется знать, незначительна; следовательно степень погрешности от уничтожения

поправки на вес гирь должна быть весьма мала. Например, первое взвешивание 13,700 граммов, второе 14,000 граммов. Разность с поправкою на вес гирь будет следующая:

$$14{,}000 - e_2 \frac{14}{8{,}5} - \left[13{,}700 - e_1 \left(\frac{13}{8{,}5} - \frac{0{,}7}{20}\right)\right] =$$

$$= 13{,}9980 - 13{,}6981 = 0{,}2999,$$

предполагая, что при первом взвешивании вес одного куб. сантиметра воздуха $e_1 = 0{,}00120$, а во втором $e_2 = 0{,}00115$ (в действительности различие всегда будет меньше и результат еще ближе) и полагая, как всегда почти бывает, что граммовые гири латунные (уд. вес около 8,5), а мелочь платиновая (уд. вес около 20). Итак с поправкою на вес гирь разность = 0,2999 [в оригинале опечатка 2,9999. *Прим. ред.*], а без поправки она — 0,3000, следовательно, мы пренебрегаем в бо́льшей мере величиною 0,0001, до которой едва достигает чувствительность весов.

2) Можно также пренебречь поправкою на взвешивание в воздухе самого сосуда, то есть на вес воздуха, вытесняемого стенками сосуда, потому что он незначителен, оба взвешивания скоро следуют друг за другом и вес одного куб. сантиметра воздуха при этом почти не меняется, и в результате берется разность, следовательно, обе поправки взаимно уничтожаются.

Эти допущения выражаются так (см. стр. 304=18):

$$P = p_2 - p_1 + e_2 V_1;$$

где P есть вес пара, p_1 — первое и p_2 — второе взвешивание, а e_2 — вес одного куб. сантиметра воздуха при втором взвешивании.[1]

Если допустить это, то для нахождения поправки $e_2 V$ необходимо наблюдать температуру весов t_2; давление же можно принять то же, как и при запаивании сосуда, а потому все данные, собираемые при определении, суть:

p_1 — вес шара (с воздухом в воздухе).

t — исправленная температура ванны во время запаивания.

H — исправленное барометрическое давление в то же время.

p_2 — вес шара с паром в воздухе.

t_2 — температура воздуха в весах при втором взвешивании.

V_1 — объем шара, при обыкновенной температуре, близкой к t_2.[2]

w — объем воздуха, оставшегося в шаре при запаивании, при температуре, близкой к t_2.[3]

$$\text{Вес пара } P = p_2 \quad p_1 + e_2 V_1 - \frac{w \cdot 0{,}001293 \cdot H}{(1 + 0{,}00367\, t_2)\, 760}.$$

---

[1] Часто берут e_1 для поправки, но это неверно или по крайней мере менее верно.

[2] Если известен объем V при $t°$, то объем при $0° = \frac{V}{1 + 0{,}000027\, t}$.

[3] Если определили при t объем остававшегося воздуха w, то при 0° он будет $= \frac{w}{1 + 0{,}00367\, t}$.

Принимая (стр. 300=15)

$$e_2 = 0{,}001209 - 0{,}0000048\ (t_2 - 10) + 0{,}0000016\ (H - 740)$$

или короче

$$e_2 = 0{,}00129 - 0{,}0000048\, t_2 + 0{,}0000016\ (H - 760);$$

далее замечая, что

$$\frac{w \cdot 0{,}001273\, H}{1 + 0{,}00367\, t_2)\ 760} = \frac{0{,}001293\, w + 0{,}0000017\ (H - 760)\, w}{1 + 0{,}00367\, t_2}$$

или почти равно

$$w\ [0{,}00129 - 0{,}0000048\, t_2 + 0{,}0000016\ (H - 760)],$$

получим выражение для веса пара:

$$P = p_2 - p_1 + (V_1 - w)\ [0{,}00129 - 0{,}0000048\, t_2 + \\ + 0{,}0000016\ (H - 760)];$$

значит, мы допускаем, что воздух, измещенный сосудом при взвешивании, и воздух, оставшийся в шаре при измерении его объема, имели одну температуру и одно давление, что не повлечет к большим ошибкам, потому что w должно быть мало для того, чтобы результат был довольно точен, да и температуры должны быть действительно близки.

Объем пара найдется из объема шара V_1 при обыкновенной температуре (принимаем ее t_2) и из объема воздуха w, остававшегося в приборе.

Объем шара, при $t° = V_1\ [1 + 0{,}000027\ (t - t_2)]$.
Объем воздуха, оставшегося в шаре, при $t°$, будет $= w\ [1 + 0{,}00367\ (t - t_2)]$,

а потому объем пара

$$V = V_1\ [1 + 0{,}000027\ (t - t_2)] - w\ [1 + 0{,}00367\ (t - t_2)],$$

$$V = V_1 - w + (t - t_2)\ (V \cdot 0{,}000027 - w \cdot 0{,}00367).$$

А потому (стр. 319=30) плотность пара

$$D = \frac{p_2 - p_1 + (V_1 - w)\ [0{,}00129 - 0{,}0000048\, t_2 + 0{,}0000016\ (H - 760)]}{V_1 - w + (t - t_2)\ (V_1 \cdot 0{,}000027 - w \cdot 0{,}00367)} \times \\ \times \frac{587\,780 \cdot (1 + 0{,}00367\, t)}{H}.$$

Заметим, впрочем, что это сокращенное выражение должно употреблять тогда только, когда довольствуются грубым приближением. Точный вывод можно ожидать только при вводе всех поправок.

Приводим пример. Наблюденные числа [1] суть:

Вес шара	27,530	$= p_1$.
Темпер. пара исправленная . .	185°	$= t$.
Испр. давление	749 мм.	$= H$.
Вес шара с парами	27,812	$= p_2$.
Температура весов	21°,3	$= t_2$.
Объем шара	277,6 куб. сант.	$= V_1$.
Объем оставшегося воздуха . .	2,5 „ „	$= w$.

Отсюда находим:

$$p_2 - p_1 = 0{,}282 \text{ грамма}$$
$$V_1 - w = 275{,}1 \text{ куб. сант.}$$

$$0{,}00129 - 0{,}0000048\, t_2 + 0{,}0000016\,(H - 760) = \left.\begin{matrix} +\,0{,}00129 \\ -\,0{,}00010 \\ -\,0{,}00002 \end{matrix}\right\} = 0{,}00117.$$

Откуда находим:

$$P = 0{,}282 + 275{,}1 \times 0{,}00117 = 0{,}282 + 0{,}322 = 0{,}604$$

$$V = 275{,}1 + (185 - 21)\,(277{,}6 \cdot 0{,}000027 - 2{,}5 \cdot 0{,}00367) = 275{,}1 - {}^{2}\ 0{,}28 = 274{,}8.$$

Вычисляем далее по логарифмам (см. стр. 319=30),

Log P	$= 0{,}78104 - 1$	
+ Log $(1 - 0{,}00367\, t)$	$= 0{,}22504$	
+ Log $\frac{760}{0{,}001293}$	$= 5{,}76921$	
Сумма		5,77529
Log V	$= 2{,}43902$	
Log H	$= 2{,}87448$	
Сумма		5,31350
Разность сумм = Log D =		0,46179

Откуда D = 2,896.

Вычислим по тем же данным более точно, предполагая, что:

При первом взвешивании температура весов	$t_1 = 20°{,}0$
„ „ „ исправленная высота барометра	$h_1 = 760{,}0$
Удельный вес гирь	$= 8{,}5$
Удельный вес стекла	$= 2{,}5$

Истинный вес пустого сосуда найдется из уравнения (стр. 302=17):

$$B = p_1 + e_1 p_1 \cdot 0{,}28 = 27{,}530\,(1 + 0{,}001193 \cdot 0{,}28) = 27{,}5392.$$

---

[1] Заимствуем числа из Аналитической химии Шанселя и Жерара (см. след. примечание).

[2] [В оригинале опечатка: + 0,28. *Прим. ред.*].

Вес шара с паром и воздухом также найдем по уравнению (стр. 303=17):

$$D = p_2 + e_2\left(V + \frac{B}{2,5} - \frac{p_2}{8,5}\right) = 27,812 +$$

$$+ 0,001170 \cdot \left(277,6 + \frac{27,5}{2,5} - \frac{27,8}{8,5}\right) = 28,1458.$$

Необходимо еще знать вес оставшегося воздуха, чтобы знать вес пара. Для этого руководствуемся сказанным на стр. 320=31 и предполагаем, что при измерении объема оставшегося воздуха, барометрическое давление было = 753 мм., а высота ртути в шаре = 130 мм., и что температура воздуха (ртути) 15° С [1]. По этим данным вычисляем:

Объем оставшегося воздуха (назовем его w_3) при $t = 185°$ и при давлении 749 мм.

$$w_3 = w \cdot \frac{753 - 130}{749} \cdot \frac{1 + 0,00367\,t}{1 + 0,00367\,t_3} = 3,3;$$

вес этого воздуха

$$p_3 = \frac{w_3 \cdot H}{(1 + 0,00367\,t)\,587\,780} = 0,0025.$$

Очевидно, что вес пара

$$P = D - B - p_3 = \left.\begin{matrix} +\,28,1458 \\ -\,27,5392 \\ -\,\;0,0025 \end{matrix}\right\} = \left.\begin{matrix} 0,6066 \\ -0,0025 \end{matrix}\right\} = 0,6041.$$

Объем пара найдется из выражения:

$$V = V_1\,[1 + 0,000027\,(t - t_1)] - w_3 = 278,9 - 3,3 = 275,6.$$

Отсюда, по известным P и V вычисляем плотность:

$$D = \frac{P \cdot n \cdot 587\,780}{V \cdot H} = 2,822.$$ [2]

---

[1] [Менделеев, повидимому, намеревался обозначить эту температуру чрез t с каким-то индексом внизу, но в оригинале стоит после t точка. Для ясности мы заменили ее чрез $t_3 = 15°$С. *Прим. ред.*].

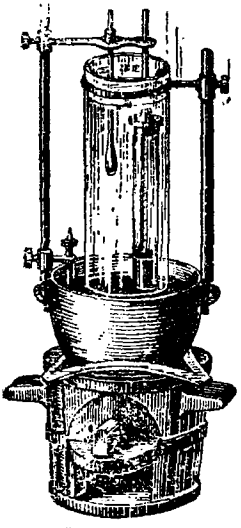
[2] Шанселъ из вышеприведенных (стр. 340=46) чисел выводит плотность 2,933, значительно далекую от действительности, потому что руководствуется, подобно многим другим авторам, формулами не вполне точными. Действительно он принимает, что

$$D = \frac{\left(p_2 - p_1 + \frac{eVH}{(1 + \alpha t_2)\,760} - \frac{ewH}{(1 + \alpha t_2)\,760}\right)(1 + \alpha t)\,760}{e \cdot [V\,(1 + k)\,(t - t_2) - w \cdot 1 + \alpha\,(t - t_2)]\,H},$$

где e = 0,0012932, α = 0,00367 и k = коэффициент расширения стекла (0,0000286). Здесь, кроме отсутствия других необходимых поправок, 1) пропущена поправка на влажность воздуха, оттого член $\frac{evH}{(1 + \alpha t_2)\,760}$ более действительного; 2) принято везде одно и то же давление, что влечет ошибку особенно в величине, выражающей объем оставшегося воздуха; 3) принимается одна и та же температура, как оставшегося воздуха при измерении его объема, так и воздуха весов. Эти допущения можно сделать, но должно глядеть на них, как на допущения, могущие повлечь за собою неверность результата, иногда довольно значительную. Различие вышевыведенного нами числа 2,896, от числа 2,933, выведенного Шанселем, происходит как от первой вышеуказанной причины, так и от различия допускаемых основных чисел, а именно значений *e* и *k*.

Способ Гэ-Люссака состоит в сущности из следующих приемов: отвешенное вещество вводят в колокол, наполненный ртутью и окруженный водою; воду кипятят и замечают объем, температуру и давление пара, образовавшегося из взятого вещества. Все данные, необходимые для определения плотности пара, тогда будут известны. Очевидно, что способ этот применим только к веществам, не действующим на ртуть и кипящим не выше 70°. Простота его приемов, небольшое количество вещества, которое требуется для него и отсутствие значительных поправок составляют его достоинство.

Исследуемое тело помещают в небольшой взвешенный стеклянный шарик, какой употребляется при органическом анализе жидкостей. Жидкость должна наполнять, по возможности, весь шарик. По наполнении шарик запаивается и взвешивается. Это дает вес взятого вещества. Этот шарик кладут в узкий цилиндр или колокол, разделенный снаружи по длине на миллиметры (или по ёмкости на куб. сантиметры, но это менее удобно) и прокалиброванный, как эвдиометр (стр. 242), чтобы знать ёмкость, соответствующую каждому делению. Размер цилиндра должен быть сообразен с количеством взятой жидкости, чтобы пар ее вмещался в цилиндре. Цилиндр предварительно наполняют чистою ртутью так, чтобы не осталось пузырьков воздуха. Когда шарик вложен, в отверстие цилиндра вправляют пробуравленную пробку и тем вытесняют воздух, оставшийся около отверстия, и луживают это отверстие. Заперев отверстие пробки (или самого цилиндра, если он узок) пальцем, цилиндр переворачивают и опускают открытым концом в ртутную ванну, которая состоит обыкновенно из простого чугунного котла, поставленного на печи (фиг. 115) или нагреваемого другими какими-либо способами. Необходимо, чтобы в колоколе не оставалось пузырьков воздуха. Сверх колокола погружают в ртуть стеклянный цилиндр, открытый с обоих концов, и все это укрепляют особыми поддержками. Тогда наливают в наружный колокол воду и укрепляют сверху термометр. При нагревании котла, вода в стеклянном цилиндре и ртуть в колоколе нагреваются и тогда шарик лопается от расширения помещающейся в нем жидкости. Из нее образуется пар, заставляющий ртуть в колоколе опускаться. Когда вода придет в полное кипение, устанавливается постоянная температура, тогда и объем пара перестает изменяться. Его замечают по числу делений, которые занимает пар. При этом принимают во внимание и мениск ртути, если желают точных чисел. В то же время замечают температуру воды в наружном цилиндре (она близка к 100°) и давление барометра. Пар находится под давлением барометрическим без давления ртути, возвышающейся в колоколе против уровня ее в котле. Для измерения этой разности служит или сплошной, деленный на миллиметры, желез-



Фиг. 115.

ный стержень, или небольшой стерженек, какой виден на фигуре слева. Он делается железный, снабжен винтом, по концам заострен и имеет определенную длину между концами, обыкновенно 100 миллиметров. Нижний конец его устанавливается вровень с уровнем ртути в котле, потом замечают, противу какого деления колокола приходится верхний его конец и тогда прибавляют (или отнимают) длину этого стерженька к высоте ртутного столба над этим делением, чтобы получить высоту ртути в колоколе. Наблюдение это, равно как и отчет объема, полезно, а в точных наблюдениях необходимо производить посредством катетометра. Когда узнаем эту (наблюденную при 100°) высоту, ее должно разделить на 1,018, чтобы получить высоту, соответствующую 0°. Назовем эту исправленную высоту h, исправленное барометрическое давление H, объем пара (кажущийся, исправленный на мениске по калиброванию, произведенному при обыкновенной температуре t) V, вес помещенного вещества P, а температуру пара T, тогда плотность пара

$$D = \frac{P\ (1 + 0{,}00367\ T)\ 760}{V\ [1 + 0{,}000027\ (T - t)] \cdot 0{,}001293\ (H - h)}.$$

Упрощая это выражение и считая величину t малою (не выше 17—20°Ц.), получим:

$$D = \frac{P}{V}\ [1] (1 + 0{,}00365\ T) \cdot 587780\ (H - h).$$

Из этого видно, что при этом способе требуется тщательно определить:

P — вес взятой жидкости.

V — объем, занимаемый паром.

T — температуру пара, близкую здесь к 100°, и потому точно определяемую.

H — исправленное давление барометра.

h — исправленную высоту ртути в колоколе.

Поправок здесь меньше, чем в способе Дюма, а потому результат точнее.

При грубых определениях, когда T можно принять за 100°

$$D = \frac{P\ (H - h)\ 802\ 300}{V}$$

$$\mathrm{Log}\ D = \mathrm{Log}\ P + \mathrm{Log}(H - h) + 5{,}90434 - \mathrm{Log}\ V.$$

Видоизменения способа Гэ-Люссака имеют целью применить этот изящный и точный способ определения плотностей пара к телам, имеющим высокую температуру кипения, что невозможно при употреблении воды. Очевидно, что высшею границею для подобного рода определений должна служить температура около 300°, когда ртуть имеет бо́льшее давление пара.

Натансон предложил, и это нашло многих последователей, окружать

[1] В оригинале опечатка $\frac{V}{P}$. [*Прим. ред.*]

колокол воздушною ванною, нагреваемою снаружи и имеющею в боках стеклянные пластинки, допускающие отсчитывание уровня ртути. Не описываем этого способа в подробностях, потому что определение температуры пара при этом весьма мало надежно, как по невозможности удержать постоянную температуру, так и потому, что в разных частях и особенно в разных высотах, в колоколе температура бывает неодинакова в каждый момент.

Гораздо точнее видоизменение, предложенное в недавнее время Грабовским. Оно имеет ту весьма важную особенность, употребленную, если не ошибаемся, первоначально Реньо, что температура определяется по объему воздуха (лучше бы водорода), находящегося в цилиндре, подверженном тем же влияниям, как и цилиндр с парами. Изготовляются два по возможности одинаковые цилиндра с миллиметрическими делениями на наружной поверхности. Оба наполняются ртутью и помещаются рядом в воздушную ванну, нагреваемую газом. В один из цилиндров вводят шарик с жидкостью, а в другой вводят столько воздуха, чтобы объем его и давление были равны (или почти равны) объему и давлению пара. Предположим, что этого равенства вполне достигли. Тогда охлаждаем воздух, измеряем его объем и давление при обыкновенной температуре и по этому определяем вес воздуха. Очевидно, что плотность пара равна весу взятой жидкости, деленному на вес воздуха. Обе величины можно определить с точностью и без больших поправок, потому что обе определяются при самых благоприятных условиях. Так было бы, если бы пар и воздух имели действительно при одинаковой температуре один объем и одно давление. В практике же они будут иметь только близкое давление и близкий объем. Стоит узнать вес, объем и давление каждого из них и получим плотность. Действительно, если пар имеет при t° вес P, давление H и объем V, а воздух при той же температуре t° имеет вес P_1, давление H_1 и объем V_1, то при давлении H объем воздуха V будет весить:

$$\frac{P_1 HV}{H_1 V_1},$$

а потому плотность пара или отношение весов равных объемов пара и воздуха будет следующая:

$$D = \frac{P}{\frac{P_1 \cdot HV}{H_1 V_1}} = \frac{PH_1 V}{P_1 HV_1}.$$

Очевидно, что при близких V и V_1, H и H_1 незначительные погрешности наблюдения не окажут значительного влияния на результат, следовательно, с точностью должно знать P и P_1. Важнее же всего здесь отсутствие термометрического определения, по причинам вышеизложенным. В сущности здесь термометром служит цилиндр с воздухом и это есть действительно в этом случае наилучший термометр, потому что он подвержен влияниям, почти тождественным с теми, каким подвергается цилиндр с паром. Давление ртутного пара, неравенства тем-

пературы в разных слоях, изменение в коэффициенте расширения стекла и многие другие погрешности, которые делают другие способы мало точными для высоких температур — здесь почти уничтожаются, если только допустить одинаковость температур пара и воздуха. Чтобы это могло быть, необходимо иметь постоянную температуру, хотя и не одинаковую в разных слоях. Грабовский достигает этого, употребляя воздушную ванну, нагреваемую газом и охлажденную двойною стенкою с промежутком, наполненным золою. Читателей, желающих ближе познакомиться с прибором, употребляемым для этой цели, отсылаем к оригиналу, помещенному в Zeitschrift für Chemie, 1866 г., 10 Heft, стр. 301.[1]

Чтобы достигнуть высоких постоянных температур, необходимых для определения плотностей пара многих тел, нам кажется наиболее удобным употреблять для нагревания цилиндра с паром пары других жидкостей, имеющих высшую температуру кипения. Для этого нужно окружить нижнюю часть колокола металлическим сосудом с жидкостью. Этот сосуд должен кончаться стеклянным цилиндром, охватывающим колокол. Этот цилиндр можно сообщить с холодильником, если желательно собрать употребленную жидкость. Жидкость в сосуде должно кипятить и ее пары, проходя по цилиндру, нагреют колокол и пар, в нем находящийся. Температуру пара должно определить или воздушным, или обыкновенным термометром. [2]

Как удобные жидкости, кипящие при довольно постоянных температурах, должно предложить органические вещества, например, сухое совершенно чистое сивушное масло (около 130°), скипидар (около 160°) и т. п.

V. Степень точности в определении плотностей паров и газов

Формула, приведенная на стр. 319 = 30, дает возможность определить погрешность плотности. Эту формулу представим в виде:

$$D = \frac{P}{V} \cdot \frac{587\,780}{H} \cdot (1 + 0{,}00367\,t).$$

Величина D определилась бы этою формулою столь же точно, как и величина удельного веса воздуха в опыте Реньо, если бы входящие данные были вполне точны; но они в действительности заключают хотя малые погрешности, а потому требуется определить величину погрешности в D, если известны погрешности в P, V, H и t. Кроме этих погрешностей, результат может заключать ошибку от неточности законов

[1] Не приводим подробного описания по невозможности сделать его ясным без рисунков, а рисунки не было времени исполнить по случайным обстоятельствам.

[2] При употреблении этого приема для нагревания цилиндров я достигал довольно хороших результатов относительно постоянства. Определяя подобным образом плотность паров для водного спирта, я имел при 100°, 130° и 160° числа, очень согласные в разных наблюдениях.

Мариотта и Гэ-Люссака, но об этих неточностях мы здесь не станем говорить.

Величины P и V определяются чрез разность двух взвешиваний и поправки на расширение сосуда и взвешивание в воздухе. Если чрез P_1 означим вес газа или пара в воздухе, чрез e_1 вес одного кубического сантиметра воздуха, если чрез V_1 означим объем сосуда при 0° и и чрез k его коэффициент расширения, то получим:

$$D = \frac{P_1 + e_1 V_1}{V_1 (1 + kt)} \cdot \frac{587780}{H} \cdot (1 + 0{,}00367\ t).$$

Означим далее чрез:

ΔD — искомую погрешность в плотности.

ΔP — погрешность взвешивания, то есть величину, на которую мы можем ошибаться при каждом взвешивании.

Δe — погрешность в определении веса одного куб. сантиметра воздуха.

ΔV — погрешность во взвешивании сосуда с водою и без нее для определения объемов.

ΔH — погрешность в определении давления.

Δk — погрешность в коэффициенте расширения стекла и

Δt — погрешность в определении температур.

Эти погрешности мы считаем независящими от вводимых поправок, а происходящими только от неточности употребляемых мерительных приборов. Очевидно, что для определения наибольшей возможной погрешности в D, мы должны взять в числитель положительные, а в знаменатель отрицательные погрешности

$$D + \Delta D = \frac{P_1 + 2\Delta P + V_1 (e_1 + \Delta e)}{(V_1 - 2\Delta V)[1 + (k - \Delta k)(t + \Delta t)]} \cdot \frac{587\,780}{H - \Delta H} \cdot$$
$$\cdot [1 + 0{,}0036 \cdot (t + \Delta t)].$$

Величина 587 780 или $\frac{760}{0{,}001293}$, то-есть 0,001293, также заключает погрешность, но она уже вполне условна и притом незначительна сравнительно с другими погрешностями.

Определим из этого уравнения ΔD. Для этого произведем разложение в строки и пренебрежем всеми членами, заключающими вторые степени или произведения погрешностей и поправок.[1] Поэтому

$$\frac{1}{V_1 - 2\Delta V} = \frac{1}{V_1}\left(1 + \frac{2\Delta V}{V_1}\right)$$

$$\frac{1}{1 + (k - \Delta k)(t + \Delta t)} = \frac{1}{1 + kt - t\Delta k} = \frac{1}{1 + kt}\left(1 + \frac{t\Delta k}{1 + kt}\right)$$

$$\frac{1}{H - \Delta H} = \frac{1}{H}\left(1 + \frac{\Delta H}{H}\right).$$

[1] Например, произведения $(\Delta P)^2$, $(\Delta P)\cdot(\Delta V)$, $k\Delta t$, и тому подобное.

Далее имеем:

$$\frac{1}{(V_1 - 2\Delta V)\,[1 + (k - \Delta k)\,(t + \Delta t)]} = \frac{1}{V_1}\left(1 + \frac{2\Delta V}{V_1}\right)\frac{1}{1 + kt}\left(1 + \frac{t\Delta k}{1 + kt}\right) =$$

$$= \frac{1}{V_1(1+kt)}\left(1 + \frac{2\Delta V}{V_1} + \frac{t\Delta k}{1 + kt}\right).$$

Производя подобные же сокращения, получим:

$$D + \Delta D = \left[\frac{P_1 + e_1 \cdot V_1}{V_1(1 + kt)} + \frac{P_1 \cdot 2\Delta V}{V_1^2(1 + kt)} + \frac{P_1 t\Delta k}{V_1(1 + kt)} + \frac{2\Delta P}{V_1(1 + kt)} + \right.$$

$$\left. + \frac{V\Delta e}{V_1(1 + kt)}\right] \cdot \left(\frac{587\,780}{H} + \frac{587\,780\,\Delta H}{H^2}\right)(1 + 0{,}00367\,t + 0{,}00367\,\Delta t);$$

или

$$D + \Delta D = D\left(1 + \frac{2\Delta V}{V} + t\Delta k + \frac{2\Delta P}{P} + \frac{\Delta e}{D} + \right.$$

$$\left. + \frac{\Delta H}{H} + \frac{0{,}00367\,\Delta t}{1 + 0{,}00367\,t}\right);$$

отсюда

$$\Delta D = \frac{2\Delta V}{V} + \frac{2\Delta P}{P} + t\Delta k + \frac{\Delta e}{D} + \frac{\Delta H}{H} + \frac{0{,}00367\,\Delta t}{1 + 0{,}00367\,t}.$$

И так, при самой незначительной погрешности каждого отдельного действия, может накопиться довольно значительная ошибка в определении плотности. Определим приблизительную величину этой погрешности при обыкновенных в химической практике приборах и способах.

ΔV или погрешность во взвешиваниях для определения объема при сосуде емкостью от 300 до 1000 куб сант. можно принять достигающею 0,05, потому что для этой цели обыкновенно употребляются довольно грубые весы.

ΔP гораздо меньше ее, потому что для взвешивания газа или пара употребляются хорошие весы, но все же, принимая неверность весов и гирь, можно считать ΔP не менее 0,002 грамма.

Δk не менее 0,000003, потому что стекла разного состава имеют не одинаковый коэффициент расширения, разнящийся примерно на приведенную величину, а обыкновенно коэффициент расширения стекла не определяется, а принимается за известную величину.

Δe должно признать 0,00003, если определения веса одного куб. сантиметра воздуха производятся обыкновенными способами.

ΔH обыкновенно не менее 0,6 миллиметра, если даже сделана поправка на температуру ртути.

Δt весьма различна. Для проверенных термометров между 0° и 100° она обыкновенно не более 0,5, при обыкновенных термометрах, деленных на целые градусы, для высших же температур она гораздо

значительнее и достигает в высшем пределе по крайней мере до 3—5°.

В примере, приведенном на стр. 340 = 46, даны величины P, V, t и H для данного частного случая, а потому для него

$$\Delta D = \frac{0,1}{277} + \frac{0,004}{0,28} + 185 \cdot 0,000003 + \frac{0,00003}{2,9} + \frac{0,6}{750} + \frac{0,00367 \cdot 3}{1,68} =$$

$$= 0,0004 + 0,0143 + 0,0006 + 0,0000 + 0,0008 + 0,0065 = 0,0226.$$

Обыкновенно точность в определении плотностей паров не превышает этой величины, часто она гораздо меньше, что видно из повторения одного и того же определения несколько раз.

Очевидно, что главная погрешность зависит от отношения погрешностей взвешивания к весу газа, а потому, чем больше взят будет объем газа, тем точнее, как само собою разумеется, будет определена плотность.

Пренебрегая малыми погрешностями, можно принять, если все поправки введены, что погрешность в плотности газа или пара:

$$\Delta D = \frac{2\Delta P}{P} + \frac{2\Delta V}{V} + \frac{0,00367\Delta t}{1 + 0,00367t}.$$

Из чего видно, что главное внимание наблюдателя должно сосредоточиваться на точном определении величин P, V и t.

Если не производить всех главных поправок, то, конечно, погрешность будет еще более.

Достоинство разных способов определения зависит от того, на сколько они содействуют уменьшению погрешности результата.

В этом отношении способ определения плотностей газов при 0° имеет то достоинство, что уничтожает погрешности Δk и Δt, а при взвешивании посредством двух равнообъемных шаров, уничтожается и погрешность Δe, следовательно, все возможные для устранения погрешности; а потому комбинация этих способов дает точнейший результат при прочих равных обстоятельствах.

Способ Гэ-Люссака и все ему подобные, где P определяется чрез взвешивание жидкости, представляют то важное преимущество, что значительно уменьшают погрешность ΔP, самую важную из всех других, а потому усовершенствование этих способов должно обращать, как уже и обращает, на себя большое внимание экспериментаторов. При этих способах ΔV может быть мало, потому что сосуд раз навсегда может быть хорошо калиброван, погрешность Δe не имеет значения,— все внимание должно обратить на точное определение и, главное, на равномерность температуры, то есть на уменьшение Δt, что, как мы видели, может быть достигнуто, употребляя два рядом стоящие колокола.

Способ Дюма и ему подобные способы, особенно при высоких температурах, то-есть при больших Δt представляют наиболее шансов для увеличения погрешности ΔD, а потому его должно по возможности избегать, когда желают уменьшения погрешности.

Таблица 1

Давление насыщенного водяного пара при разных температурах Цельсия в миллиметрах ртутного (при 0°) столба, по Реньо

Температура Цельсия	Давление в миллиметрах	Разность на 1/10 градуса	Температура Цельсия	Давление в миллиметрах	Разность на 1/10 градуса	Температура Цельсия	Давление в миллиметрах	Разность на 1/10 градуса
0	4,6	0,03	12	10,5	0,07	24	22,2	0,14
1	4,9	0,04	13	11,2	0,07	25	23,6	0,14
2	5,3	0,04	14	11,9	0,08	26	25,0	0,15
3	5,7	0,04	15	12,7	0,08	27	26,5	0,16
4	6,1	0,04	16	13,5	0,09	28	28,1	0,17
5	6,5	0,05	17	14,4	0,09	29	29,8	0,17
6	7,0	0,05	18	15,3	0,10	30	31,5	0,19
7	7,5	0,05	19	16,3	0,11	31	33,4	0,20
8	8,0	0,06	20	17,4	0,11	32	35,4	0,20
9	8,6	0,06	21	18,5	0,12	33	37,4	0,22
10	9,2	0,06	22	19,7	0,12	34	39,6	0,22
11	9,8	0,07	23	20,9	0,13	35	41,8	0,24
12	10,5		24	22,2		36	44,2	

Давление насыщенного водяного пара при температурах, близких к 100° Ц. для определения поправок термометров, по Реньо

Температура Цельсия	Давление в миллиметрах	Температура Цельсия	Давление в миллиметрах
98,0	707,26	99,6	749,18
98,1	709,82	99,7	751,87
98,2	712,39	99,8	754,57
98,3	714,97	99,9	757,28
98,4	717,56	100,0	760,00
98,5	720,15	100,1	762,73
98,6	722,75	100,2	765,46
98,7	725,35	100,3	768,20
98,8	727,96	100,4	771,95
98,9	730,58	100,5	773,71
99,0	733,21	100,6	776,48
99,1	735,85	100,7	779,26
99,2	738,50	100,8	782,04
99,3	741,16	100,9	784,83
99,4	743,83	101,0	787,63
99,5	746,50		

Таблица 2

Вес одного куб. сантиметра сухого, чистого воздуха.

Логарифмы этого веса при разных температурах, при постоянном давлении в 760 мм

Температура	Логарифм веса	Разность на $^1/_{10}$ градуса	Температура	Логарифм веса	Разность на $^1/_{10}$ градуса
0°	0,11167—3	15,9	15°	0,08840—3	15,1
1	0,11008—3	15,8	16	0,08689—3	15,0
2	0,10850—3	15,8	17	0,08539—3	15,0
3	0,10692—3	15,8	18	0,08389—3	14,9
4	0,10534—3	15,7	19	0,08240—3	14,9
5	0,10377—3	15,6	20	0,08091—3	14,8
6	0,10221—3	15,6	21	0,07943—3	14,8
7	0,10065—3	15,5	22	0,07795—3	14,7
8	0,09910—3	15,4	23	0,07648—3	14,7
9	0,09756—3	15,4	24	0,07501—3	14,6
10	0,09602—3	15,3	25	0,07355—3	14,6
11	0,09449—3	15,3	26	0,07209—3	14,5
12	0,09296—3	15,3	27	0,07064—3	14,5
13	0,09143—3	15,2	28	0,06919—3	14,4
14	0,08991—3	15,1	29	0,06775—3	14,4
15	0,08840—3		30	0,06631—3	

Поправка предыдущего логарифма на давление, отличающееся от 760 мм. Если H более 760 на величину (миллиметров) первого столбца, то должно к логарифму прибавить величину во втором столбце находящуюся, а если меньше, то убавить; сумма или разность даст логарифм веса одного куб. сантиметра при данном давлении.

мм.	Поправки логарифма	мм.	Поправки логарифма
1	0,00057	6	0,00342
2	0,00114	7	0,00399
3	0,00171	8	0,00456
4	0,00228	9	0,00513
5	0,00285		

Например: Вес одного куб. сантиметра воздуха при 25,3° и при 756 миллиметрах? По первой таблице при 25° Log = 0,07355 — 3, на $^1/_{10}$ разность = 14,6, следовательно, на 3/10 она = 43,8 или 44, следовательно, при 760 и 25°,3 Log = 0,07311 — 3. Давление 756 менее 760 на 4 мм., следовательно, по второй таблице должно отнять 0,00228, а потому Log веса = 0,07083 — 3, а вес = 0,001177 граммам.

Таблица 3

Вес одного куб. сантиметра обыкновенного воздуха, содержащего влажность. Давления (в первом вертикальном столбце) даны в миллиметрах без поправки на температуру ртути, а по прямому показанию барометра

t =	14°	15°	16°	17°	18°	19°	20°	21°	22°	23°
742	0,001193	0,001188	0,001183	0,001179	0,001174	0,001170	0,001165	0,001160	0,001156	0,001150
744	0,001196	0,001192	0,001187	0,001182	0,001177	0,001173	0,001168	0,001164	0,001159	0,001153
746	0,001199	0,001195	0,001190	0,001186	0,001180	0,001176	0,001171	0,001167	0,001162	0,001156
748	0,001202	0,001198	0,001193	0,001189	0,001184	0,001179	0,001174	0,001170	0,001165	0,001159
750	0,001206	0,001201	0,001196	0,001192	0,001187	0,001183	0,001178	0,001173	0,001168	0,001162
752	0,001209	0,001205	0,001199	0,001196	0,001190	0,001186	0,001181	0,001176	0,001172	0,001165
754	0,001212	0,001208	0,001203	0,001198	0,001193	0,001189	0,001184	0,001179	0,001175	0,001169
756	0,001215	0,001211	0,001206	0,001202	0,001196	0,001192	0,001187	0,001183	0,001178	0,001172
758	0,001219	0,001214	0,001209	0,001205	0,001200	0,001195	0,001190	0,001186	0,001181	0,001175
760	0,001222	0,001217	0,001212	0,001208	0,001203	0,001198	0,001193	0,001189	0,001184	0,001178
762	0,001225	0,001221	0,001215	0,001211	0,001206	0,001202	0,001196	0,001192	0,001187	0,001181
764	0,001228	0,001224	0,001219	0,001214	0,001209	0,001205	0,001200	0,001195	0,001190	0,001184
766	0,001231	0,001227	0,001222	0,001218	0,001212	0,001208	0,001203	0,001198	0,001194	0,001187

Таблица 4

Таблица объемов и удельных весов воды, по Депре́

Температура	Объем	Удельный вес	Температура	Объем	Удельный вес
0	1,0001269	0,999873	18	1,00139	0,998612
1	1,0000730	0,999927	19	1,00158	0,998422
2	1,0000334	0,999966	20	1,00179	0,998213
3	1,0000083	0,999999	21	1,00200	0,998004
4	1,	1,	22	1,00222	0,997784
5	1,0000082	0,999999	23	1,00244	0,967566
6	1,0000309	0,999969	24	1,00271	0,997297
7	1,0000708	0,999929	25	1,00293	0,997078
8	1,0001216	0,999878	26	1,00321	0,996800
9	1,0001879	0,999812	27	1,00345	0,996562
10	1,0002684	0,999731	28	1,00374	0,996274
11	1,0003598	0,999640	29	1,00403	0,995986
12	1,0004724	0,999527	30	1,00433	0,995688
13	1,0005862	0,999414	31	1,00463	0,995391
14	1,0007146	0,999285 [1]	32	1,00494	0,996084
15	1,0008751	0,999125	33	1,00525	0,994777
16	1,0010215	0,998979	34	1,00555	0,994480
17	1,0012067	0,998794	35	1,00593	0,994104 [1]

Удельный вес воды, по Коппу

Температура по Цельсию	Удельный вес воды, принимая ее при 4° за 1	Температура по Цельсию	Удельный вес воды, принимая ее при 4° за 1
0°	0,99988	16	0,99903
1	0,99993	17	0,99887
2	0,99997	18	0,99869
3	0,99999	19	0,99851
4	0,00000	20	0,99831
5	0,99999	21	0,99810
6	0,99997	22	0,99789
7	0,99994	23	0,99766
8	0,99989	24	0,99742
9	0,99983	25	0,99717
10	0,99975	26	0,99691
11	0,99966	27	0,99664
12	0,99956	28	0,99637
13	0,99945	29	0,99608
14	0,99032	30	0,99579
15	0,99918		

Таблица 5

Поправка наблюденного давления ртутного столба, для перевода к 0° (из сочинения Бунзена).

Если, например, дано при определении плотности пара, что газ находится под давлением барометра при 28°, равном 737,1 мм., без давления колонны ртути высотою в 127,0 мм., нагретой до 100°, — нужно знать высоту ртутного столба при 0°, выражающего давление пара?

[1] [Опечатки в оригинале: 0,996285 и 0,994404. *Прим. ред.*]

По таблице имеем, что при 755 мм. (ближайшее данное) на 2° высоту нужно уменьшить на 0,25836, следовательно, при 20° нужно уменьшить на 2,58, да на 8° уменьшение равно 1,03, следовательно, все уменьшение = 3,61, а потому истинное барометрическое давление = 757,1 — — 3,6 = 753,5. Точно так же для 125 мм. находим уменьшения для 10° = = 0,21387, следовательно, для 100° оно = 2,1, а потому отрицательное давление столба ртути в колоколе = 127,0 — 2,1 = 124,9, а потому давление, под которым находится пар, = 753,5 — 124,9 = 628,6 мм. ртутного столба при 0°.

Поправки показаний барометра

Выс.	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°
5	0.00085	0.00171	0.00256	0.00342	0.00428	0.00513	0.00599	0.00684	0.00770	0.00855
10	0.00171	0.00342	0.00513	0.00684	0.00856	0.01027	0.01198	0.01369	0.01540	0.01711
15	0.00256	0.00513	0.00769	0.01026	0.01284	0.01540	0.01797	0.02053	0.02310	0.02566
20	0.00342	0.00684	0.01027	0.01368	0.01712	0.02054	0.02396	0.02738	0.03080	0.03422
25	0.00427	0.00855	0.01283	0.01710	0.02139	0.02567	0.02995	0.03422	0.03850	0.04277
30	0.00513	0.01026	0.01540	0.02052	0.02567	0.03080	0.03593	0.04107	0.04620	0.05133
35	0.00598	0.01197	0.01797	0.02391	0.02995	0.03591	0.04192	0.04791	0.05390	0.05988
40	0.00684	0.01368	0.02053	0.02736	0.03423	0.04107	0.04791	0.05476	0.06160	0.06844
45	0.00769	0.01539	0.02310	0.03078	0.03850	0.04620	0.05390	0.06160	0.06930	0.07699
50	0.00855	0.01711	0.02567	0.03422	0.04278	0.05133	0.05989	0.06844	0.07700	0.08555
55	0.00940	0.01882	0.02824	0.03764	0.04706	0.05646	0.06588	0.07528	0.08470	0.00410
60	0.01026	0.02053	0.03080	0.01106	0.05134	0.06160	0.07187	0.08213	0.09240	0.10266
65	0.01111	0.02224	0.03337	0.04449	0.05562	0.06673	0.07786	0.08897	0.10010	0.11121
70	0.01197	0.02395	0.03597	0.04791	0.05990	0.07187	0.08385	0.09582	0.10780	0.11977
75	0.01282	0.02567	0.03850	0.05153	0.06417	0.07700	0.08983	0.10266	0.11550	0.12832
80	0.01368	0.02738	0.04106	0.05476	0.06845	0.08213	0.09582	0.10951	0.12320	0.13688
85	0.01453	0.02909	0.04363	0.05818	0.07273	0.08727	0.10181	0.11635	0 13090	0.14544
90	0.01539	0.03080	0.04619	0.06160	0.07701	0.09240	0.10780	0.12320	0.13860	0.15399
95	0.01625	0.03251	0.04876	0.06502	0.08129	0.09753	0.11378	0.13004	0.14630	0.16254
100	0.01711	0.03422	0.05133	0.06844	0.08555	0.10266	0.11977	0.13688	0.15399	0.17110
105	0.01796	0.03593	0.05390	0.07186	0.08983	0.10779	0.12576	0.14372	0.16169	0.17966
110	0.01882	0.03764	0.05646	0.07528	0.09411	0.11293	0.13175	0.15057	0.16939	0.18821
115	0.01967	0.03935	0.05903	0.07871	0.09839	0.11806	0.13774	0.15741	0.17709	0.19676
120	0.02053	0.04106	0.06160	0.08213	0.10266	0.12320	0.14372	0.16426	0.18479	0.20532
125	0.02138	0.04278	0.06416	0.08555	0.10694	0.12833	0.14971	0.17110	0.19248	0.21387
130	0.02224	0.04449	0.06673	0.08898	0.11122	0.13346	0.15570	0.17795	0.20018	0.22243
135	0.02309	0.04620	0.06929	0.09240	0.11549	0.13860	0.16169	0.18479	0.20788	0.23098
140	0.02395	0.04791	0.07186	0.09582	0.11977	0.14374	0.16767	0.19164	0.21558	0.23954
145	0.02480	0.04962	0.07442	0.09924	0.12405	0.14887	0.17366	0.19848	0.22328	0.24809
150	0.02566	0.05133	0.07699	0.10266	0.12832	0.15399	0.17965	0.10532	0.23098	0.25665
155	0.02651	0.05304	0.07956	0.10608	0.13260	0.15912	0.18564	0.21216	0.23868	0.26520
160	0.02737	0.05475	0.08212	0.10950	0.13688	0.16426	0.19163	0.21901	0.24638	0.27376
165	0.02822	0.05646	0.08469	0.11293	0.14116	0.16939	0.19762	0.22585	0.25408	0.28231
170	0.02908	0.05817	0.08726	0.11635	0.14543	0.17553	0.20361	0.23270	0.26178	0.29087
175	0.02994	0.05989	0.08982	0.11977	0.14971	0.17966	0.20959	0.23954	0.26948	0.29942
180	0.03079	0.06160	0.09239	0.12320	0.15399	0.18479	0.21558	0.24639	0.27718	0.30798
185	0.03165	0.06331	0.09495	0.12662	0.15828	0.18993	0.22157	0.25323	0.28488	0.31653
190	0.03250	0.06502	0.09752	0.13004	0.16294	0.19506	0.22756	0.26008	0.29258	0.32509
195	0.03336	0.06673	0.10008	0.13346	0.16682	0.20019	0.23355	0.26692	0.30028	0.33364
200	0.03422	0.06844	0.10266	0.13688	0.17110	0.20532	0.23954	0.27376	0.30798	0.34220
205	0.03507	0.07015	0.10523	0.14030	0.17538	0.21045	0.24553	0.28060	0.31568	0.35075
210	0.03593	0.07186	0.10779	0.14372	0.17966	0.21559	0.25152	0.28745	0.32338	0.35931
215	0.03678	0.07357	0.11036	0.14715	0.18394	0.22072	0.25751	0.29429	0.33108	0.36786

Продолжение

Выс.	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°
220	0.03764	0.07528	0.11293	0.15057	0.18821	0.22586	0.26449	0.30114	0.33878	0.37642
225	0.03849	0.07700	0.11549	0.15399	0.19425	0.23099	0.26948	0.30798	0.34647	0.38497
230	0.03935	0.07870	0.11805	0.15742	0.19677	0.23612	0.27547	0.31483	0.35417	0.39353
235	0.04020	0.08042	0.12061	0.16084	0.20105	0.24126	0.28145	0.32167	0.36187	0.40208
240	0.04106	0.08213	0.12318	0.16426	0.20532	0.24639	0.28744	0.32852	0.36957	0.41064
245	0.04191	0.08384	0.12575	0.16768	0.20960	0.25152	0.29343	0.33536	0.37727	0.41919
250	0.04277	0.08555	0.12832	0.17110	0.21387	0.25665	0.29942	0.34220	0.38497	0.42775
255	0.04362	0.08726	0.13089	0.17452	0.21815	0.26178	0.30541	0.34904	0.39267	0.43630
260	0.04448	0.08897	0.13345	0.17794	0.22243	0.26692	0.31140	0.35589	0.40037	0.44486
265	0.04534	0.09068	0.13601	0.18137	0.22671	0.27205	0.31739	0.36273	0.40807	0.45341
270	0.04619	0.09269	0.13858	0.18479	0.23098	0.27719	0.32338	0.36958	0.41577	0.46197
275	0.04705	0.09411	0.14115	0.18921	0.23526	0.28232	0.32936	0.37642	0.42347	0.47052
280	0.04790	0.09582	0.14371	0.19164	0.23954	0.28745	0.33535	0.38327	0.43117	0.47908
285	0.04876	0.09753	0.14628	0.19506	0.24381	0.29259	0.34134	0.39011	0.43887	0.48763
290	0.04961	0.09924	0.14884	0.19848	0.24809	0.29772	0.34733	0.39696	0.44657	0.49619
295	0.05047	0.10094	0.15141	0.20190	0.25237	0.30295	0.35332	0.40380	0.45427	0.50474
300	0.05133	0.10266	0.15399	0.20532	0.25665	0.30798	0.35931	0.41064	0.46197	0.51330
305	0.05218	0.10437	0.15656	0.20874	0.26093	0.31311	0.36530	0.41748	0.46967	0.52185
310	0.05304	0.10608	0.15912	0.21216	0.26521	0.31825	0.37129	0.42433	0.47737	0.53041
315	0.05389	0.10779	0.16169	0.21559	0.26949	0.32338	0.37728	0.43117	0.48507	0.53896
320	0.05475	0.10951	0.16426	0.21901	0.27376	0.32852	0.38326	0.43802	0.49277	0.54752
325	0.05560	0.11122	0.16682	0.22243	0.27804	0.33365	0.38925	0.44486	0.50046	0.55607
330	0.05646	0.11293	0.16939	0.22586	0.28232	0.33878	0.39524	0.45171	0.50816	0.56463
335	0.05731	0.11464	0.17195	0.22928	0.28659	0.34392	0.40122	0.45855	0.51586	0.57318
340	0.05817	0.11635	0.17452	0.23270	0.29087	0.34905	0.40721	0.46540	0.52356	0.58174
345	0.05902	0.11806	0.17708	0.23612	0.29515	0.35418	0.41320	0.47224	0.53126	0.59029
350	0.05988	0.11977	0.17965	0.23954	0.29942	0.35931	0.41919	0.47908	0.53896	0.59885
355	0.06074	0.12148	0.18222	0.24296	0.30370	0.36444	0.42518	0.48592	0.54666	0.60740
360	0.06159	0.12319	0.18478	0.24638	0.30798	0.36958	0.43117	0.49277	0.55436	0.61596
365	0.06245	0.12490	0.18735	0.24981	0.31226	0.37471	0.43716	0.49961	0.56206	0.62451
370	0.06330	0.12662	0.18992	0.25323	0.31653	0.37985	0.44315	0.50646	0.56976	0.63307
375	0.06416	0.12833	0.19248	0.25665	0.32081	0.38498	0.44913	0.51330	0.57746	0.64162
380	0.06501	0.13004	0.19505	0.26008	0.32509	0.39011	0.45512	0.52015	0.58516	0.65018
385	0.06587	0.13175	0.19761	0.26350	0.32937	0.39525	0.46111	0.52699	0.59286	0.65873
390	0.06672	0.13346	0.20018	0.26692	0.33364	0.40038	0.46710	0.53384	0.60056	0.66729
395	0.06758	0.13517	0.20274	0.27034	0.33792	0.40552	0.47309	0.53068	0.60826	0.67584
400	0.06844	0.13688	0.20532	0.27306	0.34220	0.41064	0.47908	0.54752	0.61596	0.68440
405	0.06929	0.13859	0.20789	0.27718	0.34648	0.41577	0.48507	0.55436	0.62366	0.69295
410	0.07015	0.14030	0.21045	0.28060	0.35076	0.42091	0.49106	0.56121	0.63136	0.70151
415	0.07100	0.14201	0.21302	0.28403	0.35504	0.42604	0.49705	0.56805	0.63906	0.71006
420	0.07186	0.14373	0.21559	0.28745	0.35931	0.43118	0.50303	0.57490	0.64676	0.71862
425	0.07271	0.14544	0.21815	0.29087	0.36359	0.43631	0.50902	0.58174	0.65445	0.72717
430	0.07357	0.14715	0.22072	0.29430	0.36787	0.44144	0.51501	0.58859	0.66215	0.73573
435	0.07442	0.14886	0.22328	0.29772	0.37215	0.44658	0.52099	0.59543	0.66985	0.74428
440	0.07528	0.15057	0.22585	0.30114	0.37642	0.45171	0.52698	0.60278	0.67755	0.75284
445	0.07613	0.15228	0.22841	0.30456	0.38070	0.45684	0.53297	0.60912	0.68525	0.76139
450	0.07699	0.15399	0.23098	0.30798	0.38497	0.46197	0.53896	0.61596	0.69295	0.76995
455	0.07785	0.35570	0.23355	0.31140	0.38925	0.46710	0.54495	0.62280	0.70065	0.77850
460	0.07870	0.14741	0.23612	0.31482	0.39353	0.47224	0.55094	0.62965	0.70835	0.78706
465	0.07956	0.15912	0.23868	0.31825	0.39781	0.47737	0.55693	0.63649	0.71605	0.79561
470	0.08041	0.16084	0.24125	0.32167	0.40208	0.48251	0.56292	0.64334	0.72375	0.80417
475	0.08127	0.16255	0.24382	0.32509	0.40636	0.48764	0.56890	0.65018	0.73145	0.81273
480	0.08212	0.16426	0.24638	0.32852	0.41064	0.49277	0.57489	0.65803	0.73915	0.82128
485	0.08298	0.16597	0.24895	0.33194	0.41491	0.49791	0.58088	0.66387	0.74685	0.82983

Продолжение

Выс.	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°
490	0.08383	0.16768	0.25151	0.33536	0.41919	0.50304	0.58687	0.67072	0.75455	0.83839
495	0.08469	0.16949	0.25408	0.33878	0.42347	0.50817	0.59286	0.67756	0.76225	0.84694
500	0.08555	0.17110	0.25665	0.34220	0.42775	0.51330	0.59885	0.68440	0.76995	0.85550
505	0.08641	0.17281	0.25922	0.34562	0.43203	0.51843	0.60484	0.69124	0.77765	0.86405
510	0.08726	0.17452	0.26108	0.34904	0.43631	0.52357	0.61083	0.69809	0.78535	0.87261
515	0.08811	0.17623	0.26435	0.35247	0.44059	0.52870	0.61682	0.70493	0.79305	0.88116
520	0.08897	0.17795	0.26692	0.35589	0.44486	0.53384	0.62280	0.71178	0.80075	0.88972
525	0.08982	0.17966	0.26948	0.35931	0.44914	0.53897	0.62879	0.71862	0.80844	0.89827
530	0.09068	0.18137	0.27205	0.36274	0.45342	0.54410	0.63478	0.72547	0.81614	0.90683
535	0.09153	0.18308	0.27461	0.36616	0.45769	0.54924	0.64076	0.73231	0.82384	0.91538
540	0.09239	0.18479	0.27718	0.36958	0.46197	0.55437	0.64675	0.73916	0.83154	0.92394
545	0.09324	0.18650	0.27974	0.37300	0.46625	0.55950	0.65274	0.74600	0.83924	0.93249
550	0.09410	0.18821	0.28231	0.37642	0.47052	0.56463	0.65873	0.75284	0.84694	0.94105
555	0.09496	0.18992	0.28488	0.37984	0.47480	0.56976	0.66472	0.75968	0.85464	0.94960
560	0.09581	0.19163	0.28745	0.38326	0.47908	0.57490	0.67071	0.76653	0.86234	0.95816
565	0.09667	0.19334	0.29001	0.38669	0.48336	0.58003	0.67670	0.77337	0.87004	0.96671
570	0.09752	0.19506	0.29258	0.39011	0.48763	0.58517	0.68269	0.78022	0.87774	0.97427
575	0.09838	0.19677	0.29514	0.39353	0.49191	0.59030	0.68867	0.78706	0.88544	0.98382
580	0.09923	0.19848	0.29771	0.39696	0.49619	0.59543	0.69466	0.79391	0.89314	0.99238
585	0.10009	0.20019	0.30027	0.40038	0.50047	0.60057	0.70065	0.80075	0.90084	1.00093
590	0.10094	0.20190	0.30284	0.40380	0.50474	0.60570	0.70664	0.80760	0.90854	1.00949
595	0.10180	0.20361	0.30540	0.40722	0.50902	0.61083	0.71263	0.81444	0.91624	1.01804
600	0.10266	0.20532	0.30798	0.41064	0.51330	0.61596	0.71862	0.82128	0.92394	1.02660
605	0.10351	0.20703	0.31055	0.41406	0.51758	0.62109	0.72461	0.82812	0.93164	1.03515
610	0.10437	0.20874	0.31311	0.41748	0.52186	0.62623	0.73060	0.83497	0.93934	1.04371
615	0.10522	0.21045	0.31568	0.42091	0.52614	0.63136	0.73659	0.84181	0.94704	1.05226
620	0.10608	0.21217	0.31825	0.42433	0.53041	0.63650	0.74257	0.84866	0.95473	1.06082
625	0.10693	0.21388	0.32081	0.42775	0.53469	0.64163	0.74856	0.85550	0.96243	1.06937
630	0.10779	0.21559	0.32337	0.43118	0.53897	0.64676	0.75455	0.86235	0.97013	1.07793
635	0.10864	0.21730	0.32594	0.43460	0.54324	0.65190	0.76053	0.86919	0.97783	1.08648
640	0.10950	0.21901	0.32850	0.43902	0.54752	0.65703	0.76652	0.87604	0.98553	1.09504
645	0.11035	0.22072	0.33107	0.44144	0.55180	0.66216	0.77251	0.88288	0.99323	1.10359
650	0.11121	0.22243	0.33364	0.44486	0.55607	0.66729	0.77850	0.88972	1.00093	1.11215
655	0.11207	0.22414	0.33621	0.44828	0.56035	0.67242	0.78449	0.89656	1.00863	1.12070
660	0.11292	0.22585	0.33877	0.45170	0.56463	0.67756	0.79048	0.90341	1.01633	1.12926
665	0.11378	0.22756	0.34134	0.45513	0.56891	0.68269	0.79647	0.91025	1.02403	1.13781
670	0.11463	0.22928	0.34391	0.45855	0.57318	0.68783	0.80246	0.91710	1.03173	1.14637
675	0.11549	0.23099	0.34647	0.46197	0.57746	0.69296	0.80844	0.92394	1.03943	1.15492
680	0.11634	0.23270	0.34904	0.46540	0.58174	0.69809	0.81443	0.93079	1.04613	1.16348
685	0.11720	0.23431	0.35160	0.46882	0.58602	0.70323	0.82042	0.93763	1.05483	1.17203
690	0.11805	0.23612	0.35417	0.47224	0.59029	0.70836	0.82641	0.94448	1.06253	1.18059
695	0.11891	0.23783	0.35673	0.47566	0.59457	0.71349	0.83240	0.95132	1.07023	1.18914
700	0.11977	0.23954	0.35931	0.47908	0.59885	0.71862	0.83839	0.95816	1.07793	1.19770
705	0.12062	0.24125	0.36188	0.48250	0.60313	0.72375	0.84438	0.96500	1.08563	1.20625
710	0.12148	0.25296	0.36444	0.48592	0.60741	0.72889	0.85037	0.97185	1.09333	1.21481
715	0.12233	0.24467	0.36701	0.48935	0.61169	0.73402	0.85636	0.97869	1.10103	1.22336
720	0.12319	0.24639	0.36958	0.49277	0.61596	0.73916	0.86234	0.98554	1.10873	1.23192
725	0.12404	0.24810	0.37214	0.49619	0.62024	0.74429	0.86833	0.99238	1.11642	1.24047
730	0.12490	0.24991	0.37471	0.49962	0.62452	0.74942	0.87432	0.99923	1.12412	1.24903
735	0.12575	0.25152	0.37727	0.50304	0.62880	0.75456	0.88030	1.00607	1.13182	1.25758
740	0.12661	0.25323	0.37984	0.50646	0.63307	0.75969	0.88629	1.01292	1.13952	1.26614
745	0.12746	0.25494	0.38240	0.50988	0.63735	0.76482	0.89228	1.01977	1.14722	1.27469
750	0.12832	0.25665	0.38497	0.51330	0.64162	0.76995	0.89827	1.02660	1.15492	1.28325

Продолжение

Выс.	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°
755	0.12918	0.25836	0.38754	0.51672	0.64590	0.77508	0.90426	1.03344	1.16262	1.29180
760	0.13003	0.26007	0.39011	0.52014	0.65018	0.78022	0.91025	1.04029	1.17032	1.30036
765	0.13089	0.26178	0.39267	0.52357	0.65446	0.78535	0.91624	1.04713	1.17802	1.30891
770	0.13174	0.26350	0.39525	0.52699	0.65873	0.79049	0.92223	1.05398	1.18572	1.31747
775	0.13260	0.26521	0.39781	0.53041	0.66301	0.79562	0.92821	1.06082	1.19342	1.32602
780	0.13345	0.26692	0.40037	0.53383	0.66729	0.80075	0.93120	1.06767	1.20112	1.33458
785	0.13431	0.26863	0.40294	0.53725	0.67157	0.80589	0.94019	1.07451	1.20882	1.34313
790	0.13516	0.27034	0.40550	0.54067	0.67584	0.81102	0.94618	1.08136	1.21652	1.35169
795	0.13602	0.27205	0.40807	0.54409	0.68012	0.81615	0.95217	1.08820	1.22422	1.36024
800	0.13688	0.27376	0.41064	0.54752	0.68440	0.82128	0.95816	1.09504	1.23192	1.36880
805	0.13763	0.27547	0.41321	0.55094	0.68868	0.82641	0.96415	1.10188	1.23962	1.37735
810	0.13859	0.27718	0.41577	0.55436	0.69296	0.83855	0.97014	1.10873	1.24732	1.38591
815	0.13944	0.27889	0.41831	0.55779	0.69724	0.83668	0.97613	1.11557	1.25502	1.39446
820	0.14030	0.28061	0.42091	0.56121	0.70151	0.84182	0.98211	1.12242	1.26272	1.40302
825	0.14115	0.28232	0.42347	0.56463	0.70579	0.84695	0.98810	1.12926	1.27041	1.41157
830	0.14201	0.28403	0.42604	0.56806	0.71007	0.85208	0.99409	1.13611	1.27811	1.42013
835	0.14286	0.28574	0.42860	0.57148	0.71435	0.85722	1.00007	1.14295	1.28581	1.42868
840	0.14372	0.28745	0.43117	0.57490	0.71862	0.86235	1.00606	1.14980	1.29351	1.43724
845	0.14457	0.28916	0.43373	0.57832	0.72290	0.86758	1.01205	1.15664	1.30121	1.44579
850	0.14543	0.29087	0.43630	0.58174	0.72717	0.87261	1.01804	1.16348	1.30891	1.45435
855	0.14629	0.29258	0.43887	0.58516	0.73145	0.87775	1.02403	1.17032	1.31661	1.46290
860	0.14714	0.29429	0.44144	0.58858	0.73573	0.88288	1.03002	1.17717	1.32431	1.47146
865	0.14800	0.29600	0.44400	0.59201	0.74001	0.88801	1.03601	1.18401	1.33201	1.48001
870	0.14885	0.29772	0.44657	0.59543	0.74428	0.89315	1.04200	1.19086	1.33971	1.48857
875	0.14971	0.29943	0.44914	0.59885	0.74856	0.89828	1.04998	1.19770	1.34741	1.49712
880	0.15056	0.30114	0.45170	0.60228	0.75284	0.90341	1.05397	1.20455	1.35511	1.50568
885	0.15142	0.30285	0.45427	0.60570	0.75712	0.90855	1.05996	1.21139	1.36281	1.51423
890	0.15227	0.30456	0.45683	0.60912	0.76139	0.91368	1.06595	1.21824	1.37051	1.52279
895	0.15313	0.30627	0.45940	0.61254	0.76567	0.91881	1.07196	1.22508	1.37821	1.53134
900	0.15399	0.30798	0.46197	0.61596	0.76995	0.92394	1.07793	1.23192	1.38591	1.53990
905	0.15484	0.30969	0.46565	0.61938	0.77423	0.92907	1.08392	1.23876	1.39361	1.54845
910	0.15570	0.31140	0.46710	0.62280	0.77851	0.93421	1.08991	1.24561	1.40131	1.55701
915	0.15655	0.31311	0.46967	0.62623	0.78279	0.93934	1.09590	1.25245	1.40901	1.56556
920	0.15741	0.31483	0.47224	0.62965	0.78706	0.94448	1.10188	1.25930	1.41671	1.57412
925	0.15826	0.31654	0.47480	0.63307	0.79134	0.94961	1.10787	1.26614	1.42440	1.58267
930	0.15912	0.31825	0.47737	0.63650	0.79552	0.95474	1.11386	1.27299	1.43210	1.59123
935	0.15997	0.31996	0.47993	0.63992	0.79989	0.95988	1.11984	1.27983	1.43980	1.59978
940	0.16083	0.32167	0.48250	0.64334	0.80417	0.96501	1.12583	1.28668	1.44750	1.60834
945	0.16168	0.32338	0.48506	0.64676	0.80845	0.97014	1.13182	1.29352	1.45520	1.61689
950	0.16254	0.32509	0.48763	0.65018	0.81273	0.97557	1.13781	1.30036	1.46290	1.62545
955	0.16339	0.32680	0.49020	0.65360	0.81701	0.98040	1.14380	1.30720	1.47060	1.63400
960	0.16425	0.32851	0.49277	0.65702	0.82129	0.98554	1.14979	1.31405	1.47830	1.64256
965	0.16510	0.33022	0.49533	0.66045	0.82557	0.99067	1.15578	1.32089	1.48600	1.65111
970	0.16596	0.33193	0.49790	0.66387	0.82984	0.99581	1.16176	1.32774	1.49370	1.65967
975	0.16681	0.33364	0.50047	0.66729	0.83412	1.00094	1.16775	1.33458	1.50140	1.66822
980	0.16767	0.33535	0.50303	0.67072	0.83840	1.00607	1.17374	1.34143	1.50910	1.67678
985	0.16852	0.33706	0.50560	0.67414	0.84268	1.01121	1.17973	1.34827	1.51680	1.68533
990	0.16938	0.33877	0.50816	0.67756	0.84695	1.01634	1.18572	1.35512	1.52450	1.69386
995	0.17024	0.34048	0.51073	0.68098	0.85123	1.02146	1.19171	1.36196	1.53220	1.70244
1000	0.17110	0.34220	0.51330	0.68440	0.85550	1.02660	1.19770	1.36880	1.53990	1.71100

Исправлен ряд опечаток, бросившихся в глаза при проверке по равностям. *Прим. ред.*].

Таблица 6

Логарифмы величины $n = 1 + 0{,}00367\,t$ для разных температур от 1° до 200°

t°	Log (1 + 0,00367 t)	t°	Log (1 + 0,00367 t)
1	0,00159	41	0,06088
2	318	42	6226
3	476	43	6364
4	633	44	6501
5	790	45	6638
6	946	46	6775
7	0,01102	47	6811
8	1257	48	7047
9	1411	49	7182
10	1565	50	7217
0°,1 соотв. разность 15		0°,1 соотв. 13	
11	0,01719	51	0,07451
12	1872	52	7585
13	2024	53	7719
14	2176	54	7852
15	2327	55	7985
16	2478	56	8117
17	2628	57	8249
18	2778	58	8381
19	2927	59	8512
20	3076	60	8643
0°,1 соотв. 15		0°,1 соотв. 13	
21	0,03224	61	0,08773
22	3371	62	8903
23	3519	63	9033
24	3666	64	9162
25	3812	65	9291
26	3958	66	9420
27	4103	67	9548
28	4248	68	9676
29	4392	69	9803
30	4536	70	9930
0°,1 соотв. 14		0°,1 соотв. 13	
31	0,04680	71	0,10057
32	4823	72	10183
33	4965	73	10309
34	5107	74	10434
35	5248	75	10559
36	5389	76	10684
37	5530	77	10809
38	5670	78	10933
39	5810	79	11057
40	5949	80	11180
0°,1 соотв 14		0°,1 соотв. 12	

t°	Log (1 + 0,00367 t)
81	0,11303
82	11426
83	11548
84	11670
85	11792
86	11913
87	12034
88	12155
89	12275
90	12395
0°,1 соотв.	12
91	0,12515
92	12634
93	12753
94	12872
95	12990
96	13108
97	13226
98	13343
99	13460
100	13577
0°,1 соотв.	12
101	0,13693
102	13809
103	13925
104	14041
105	14156
106	14271
107	14385
108	14499
109	14613
110	14727
0°,1 соотв.	11
111	0,14841
112	14954
113	15067
114	15179
115	15291
116	15403
117	15515
118	15626
119	15737
120	15848
0°,1 соотв.	11
121	0,15959
122	16069
123	16179
124	16289
125	16398
126	16507
127	16616
128	16725
129	16833
130	16941
0°,1 соотв.	11

t°	Log (1 + 0,00367 t)
131	0,17049
132	17156
133	17263
134	17370
135	17477
136	17584
137	17690
138	17796
139	17901
140	18007
0°,1 соотв.	11
141	0,18112
142	18217
143	18322
144	18426
145	18530
146	18634
147	18738
148	18841
149	18944
150	19047
0°,1 соотв.	10
151	0,19150
152	19252
153	19354
154	19456
155	19558
156	19660
157	19761
158	19862
159	19963
160	20063
0°,1 соотв.	10
161	0,20163
162	20263
163	20363
164	20463
165	20562
166	20661
167	20760
168	20859
169	20958
170	21056
0°,1 соотв.	10
171	0,21154
172	21252
173	21349
174	21447
175	21544
176	21641
177	21738
178	21834
179	21930
180	22026
0,1° соотв.	10

t°	Log (t + 0,00376 t)	t°	Log (t + 0,00376 t)
181	0,22122	191	0,23070
182	22218	192	23163
183	22313	193	23257
184	22409	194	23350
185	22504	195	23443
186	22599	196	23536
187	22693	197	23628
188	22788	198	23721
189	22882	199	23813
190	22976	200	23905
0°,1 соотв. 10		0°,1 соотв. 9	

Например, при t = 152°,3 значение 1 + 0,00367 t найдется следующим способом:

Log, соответствующий 152°, есть . . . 0,19252
разность на 0°,1 при 150 = 102, след.
на 0°,3 должно прибавить 30 . . . 30

Log, соотв. 152°,3 0,19282

Следовательно 1 + 0,00367 t для t = 152°,3 будет 1,559.

Таблица 7

Таблица плотностей и веса одного литра (в граммах) некоторых газов и паров

	Плотность	При 760 мм. и 0° вес одного литра в граммах
Воздух	1,000	1,293
Кислород	1,1056	1,430
Азот	0,9713	1,256
Водород	0,0692	0,089
Хлор	2,453	3,172
Иод	8.78	11,36
Аммиак	0.59	0,76
Углекислый газ	1,52	1.97
Хлористый водород . .	1,26	1,63
Сернистый газ	2,21	2,86
Болотный газ	0,55	0,72
Маслородный газ . . .	0,97	1,25
Сернистый водород .	1,17	1,51
Окись углерода	0.97	1,25
Водяной пар	0,62	0,80

Основы Химии, 1-ое издание 1869—1871 гг. Часть I (том I), главы I, IV, V; часть II (том II), глава III.

ВЫПИСКИ ИЗ 1-го ИЗДАНИЯ ОСНОВ ХИМИИ

Здесь перепечатаны только те места «Основ химии», которые имеют прямое отношение к газам и парам. В основном выписки сделаны из I издания «Основ», а из последующих изданий помещены лишь те изменения или добавления, относящиеся к газам и парам, какие были внесены в них автором.

Часть первая (т. I), первая глава

Вещества и явления, изучаемые химией

Свойства газов и паров [1]

(стр. 32—46).

Газообразное и парообразное состояние тела определяется отсутствием сцепления между частицами вещества. Они стремятся удалиться друг от друга при переходе в этот вид; только действие посторонних сил, а не внутренних, свойственных самим частицам газа, заставляет их удерживаться в известном месте. Так, атмосфера не удаляется от земли только потому, что притягивается ее массою, иначе она рассеялась бы в пространстве. Эта способность газов и паров зависит, по всей вероятности, от того, что частицы газа поглощают много тепла, приходят в состояние быстрого движения и взаимное тяготение их не может уже получить перевеса над быстро движущимися частями. Выражаясь обыкновенным языком, в массе газа сила отталкивания получила перевес над силою притяжения, частицы удалились друг от друга и находятся вне сферы притяжения. Действительно, водяной пар, при 100° и при обыкновенном атмосферном давлении, занимает в 1600 раз бóльший объем, чем та вода, из которой он получился. Удаление частиц от отсутствия между ними сцепления придает парам и газам свойство расширяться, если на эти вещества не действует какая либо сила, влияющая на расстоянии. Внутренние силы в них таковы, что частицы стремятся удалиться друг от друга и распространиться до совершенной редкости в пространстве. Если газ изъять от действия тяжести, то он занимает бесконечно большой объем. Это состояние тел есть, так сказать, конечное, в котором тело не имеет никакой внешней формы, не только кристаллической или шарообразной, но и никакой другой. Если газ и пар, в наших опытах и условиях, сохраняют известный объем, то это зависит только от того, что они находятся постоянно

---

[1] [Весь этот раздел главы первой напечатан в оригинале менее крупным шрифтом, чем стр. 1—3 этой главы, но мы ввиду его основного характера напечатали его здесь обычным шрифтом. *Прим. ред.*].

под влиянием земного притяжения и давления других частей газа. Обе эти силы действуют на расстоянии. Изъятые от действия тяжести газы наблюдаемы быть не могут, потому что рассеиваются беспредельно; но подчиненные действию тяжести или какой-либо другой силы, газы представляют все свойства жидкостей, кроме внутреннего сцепления; оттого газы характеризуются подвижностью своих частей, передачею давления во все стороны, если оно произведено будет в каком бы то ни было направлении, одним словом, представляют все свойства жидкостей. Чтобы объяснить себе отношение газов и паров к другим состояниям тел, должно допустить, что частицы газов, удаленные значительно своими центрами друг от друга, постоянно движутся, отталкиваясь между собою; только встречая преграду для такого движения, преграду, состоящую из твердого или жидкого вещества, газы могут быть сохраняемы; оттого газы и пары необходимо держать в совершенно закрытом пространстве; всякое малое отверстие достаточно для того, чтобы газ чрез него прошел и распространился в пространстве. Эта способность газов выходить из отверстий и распространяться в других газах, или в пространстве, наполненном паром, называется диффузиею газов. Быстрота диффузии, для разных газов, весьма различна; но она находится в тесной связи с плотностью газа, то-есть, с весом одной кубической меры газа; газ в 4 раза более легкий, чем какой-либо другой, в два раза скорее, противу него, вытекает чрез отверстие. Это выражается таким законом: *удельные веса газов относятся между собою, как квадраты времен, потребных для истечения* (из тонких отверстий) *равных объемов газов*. Это закон приближенный, но имеющий немалое применение в разных случаях. Пример: из тонкого отверстия воздух истек в 102,7 секунды, а углекислый газ в 127,2 секунды (при том же давлении и объеме), квадраты времен истечения относятся как 1 : 1,53, а отношение плотностей = 1 : 1,52.

Если соединить, посредством небольшого отверстия, два шара, наполненные газами неодинаковой плотности, то в первый момент соединения легчайший газ будет проникать в первый, и потому, если давление, до начала опыта, было в обоих шарах одинаково, то, по истечении некоторого времени, оно будет увеличиваться в том шаре, в котором был газ более плотный, а в другом будет уменьшаться. Но такое распределение давления газов при самом же начале изменяется. От увеличения давления в одном из шаров будет увеличиваться вытекание из него газа, потому что это вытекание зависит не от одной плотности газа, но и от давления, под которым он находится, то-есть от степени сжатия, которой подвержен газ. Очевидно из этого, что увеличение давления нельзя будет наблюдать. Газы передают давление во все стороны, а потому, при сообщении сосудов, должны иметь одинаковые давления. Но если между газами поставить пористую перегородку (например, немуравленный глиняный сосуд, гипсовую пластинку и т. п.), то чрез ее поры будет происходить диффузия, сообразная плотностям, а давление не может быстро уравниваться, и потому в сосуде, в котором был плотный газ, будет давление увеличиваться, а в том, где был легкий газ — уменьшаться. Газ, употребляемый для освещения,

легче воздуха (отчего и употребляется для наполнения аэростатов или шаров, плавающих в воздухе), а потому его присутствие в воздухе (очень опасное по взрыву и пожару, могущему произойти от этой причины) может быть открыто диффузиею. Устраивают воронку, горло которой плотно (герметически) покрывают пластинкою из обожженной пористой глины, то есть из той массы, из какой делаются обыкновенные цветочные горшки. Такое закрытое отверстие воронки обращают кверху, а горлышко изгибают, направляя также кверху, в изгиб же его наливают жидкости, например, ртути. Лишь только в воздухе будет находиться светильный газ, он проникнет чрез поры пластинки и увеличит давление газа в воронке. От этого уровень жидкости в открытом колене повысится и может дать знать (например, посредством гальванического звонка) об присутствии в воздухе легкого газа. Явление накопления газа в воронке и увеличения в ней давления должно понимать так: воздух в воронке и воздух вне ее постоянно движутся и проскакивают чрез пористую крышку. Пока плотности внутреннего и наружного воздуха одни и те же — количества частиц, проникающих с обеих сторон, в данное время, одни и те же. Но лишь только наружный воздух сделается легче внутреннего (например, от подмеси светильного газа), то снаружи внутрь будет проникать в данное время больше частиц, чем обратно, а потому в воронке будет увеличиваться давление. Очевидно, что, мало по малу, плотности опять уравняются и тогда опять количество проскакивающих частиц будет одно и то же и давления внутри и вне прибора уравновесятся.

Так как при истечении из более или менее широких отверстий, давления могут быстро уравниваться, то времена истечений не столь ясно связаны с плотностями газов, как при истечении чрез тонкие отверстия. При этих последних, нередко, принимает значительное участие трение, изменяющее результат. Оттого, при истечении газов чрез капиллярную трубку, времена истечений не вполне пропорциональны квадратным корням из плотностей. Только при употреблении тонких отверстий в тонкой пластинке или уже незаметных пор, становится очевидным ясное соотношение времен истечения и плотностей, выраженное в вышеприведенном законе. Так как газы разной плотности могут быть отчасти разделены диффузиею чрез пористые поверхности, то этим пользуются, иногда, для разделения газов, содержащихся вместе. Газы, так сказать, просеиваются чрез пористые тела, как твердые тела чрез сито, или как жидкости чрез коллоидальную ткань.

Газовое давление, судя по высказанному о свойстве газов, есть число газовых частиц, ударяющихся об преграду, препятствующую расширению газа, и потому, чем больше плотность газа, то-есть, чем больше (при прочих равных условиях) частиц его находится в данном пространстве, тем больше давление, оказываемое газом, и потому газ, сжатый в два раза, оказывает вдвое большее давление. Это и есть первый основной закон газов, именно так называемый закон Мариотта который состоит в том, что *упругость газа увеличивается пропорционально сжатию* или обратно: *объем газа увеличивается и уменьшается обратно пропорционально давлению*. Точнейшие исследова-

ния показали, однако, что и этот закон хотя близок к истине, но не абсолютно точен. Однако он, по своей простоте и общности, очень важен. Но поступательное движение, свойственное частицам газов и паров, изменяется весьма неодинаково для разных газов с изменением плотности, а потому разные газы, при различной плотности, могут оказывать одно и то же давление и, следовательно, при одном давлении представляют различную плотность. Давление, под которым находится газ на поверхности земли, равно, как известно, давлению ртутного столба в барометре. Считая удельный вес ртути в 13,59 и зная, что среднее атмосферное давление равно давлению ртутного столба высотою в 760 миллиметров, мы можем легко вычислить то давление, которое оказывает газ, например, на поверхность одного квадратного сантиметра. Столб ртути, давящий на поверхность одного квадратного сантиметра и имеющий высоту 76 сантиметров, весит $761 \cdot 13{,}59 = 1033$ граммов; а потому давление газов, в обыкновенном их состоянии, на один квадратный сантиметр = 1033 граммам. Чтобы узнать давление, под которым находится какой-либо запертый газ, нужно знать, во первых атмосферное давление, показываемое барометром, и потом то давление, под которым газ находится в сосуде, то есть, разность давления газа в сосуде и атмосферного давления. Эту последнюю разность определяют, заключая (или сообщая только, потому что давление газа во все стороны распространяется равномерно) газ в трубке, погруженной в сосуд с жидкостью; если давление газа внутри прибора будет больше атмосферного, то уровень жидкости в трубке будет ниже, чем уровень в сосуде открытом и находящемся только под давлением атмосферы; при давлении меньшем, чем атмосферное, уровень жидкости в трубке будет выше, чем в сосуде, и потому разность уровней покажет величину разности давления, выраженную столбом жидкости. Если запирающая жидкость будет ртуть, то, прибавляя или отнимая от высоты ртути в барометре высоту жидкости в трубке, можно легко узнать то давление, под которым находится газ в приборе. Если же запирающая жидкость будет вода, то, чтобы узнать величину ртутного столба, соответствующего высоте воды, нужно разделить последнюю на плотность ртути по отношению к воде. Всегда, когда работают с газами и когда измеряют их объемы, необходимо принимать во внимание то давление, под которым находится газ, и чтоб судить о том, какой же объем занял бы газ, если бы был подвержен обыкновенному среднему атмосферному давлению, нужно, судя по правилу Мариотта, помножить наблюдаемый объем на то давление, под которым находится газ, и разделить это произведение на 760, потому что $V : v = h : H$, где V означает наблюдаемый объем газа, под давлением H, а v означает объем того же газа под давлением нормальным h или 760 мм. Из этой пропорции видно, что $v = \frac{V \cdot H}{h}$. Обыкновенно сравнивают объемы газов только тогда, когда они находятся под одинаковыми давлениями, и потому всегда, когда производят такие сравнения, нужно наблюдать и давление, под которым находится газ, и делать перевод объема к объему под обыкновенным давлением. Так, например, если газ находится в стек-

лянной трубке, запертой сверху и опрокинутой в воду, так что часть воды будет находиться в самой трубке и разность уровней воды в сосуде и в трубке будет равна N мм., то газ, заключенный в трубке, будет находиться под давлением атмосферы, назовем его H (высота барометра, исправленная на температуру ртути) без того давления, которое свойственно столбу воды, имеющему высоту N; значит, газ будет находиться под давлением $H - \frac{N}{13,5}$. Чтобы узнать, какой объем займет газ под нормальным давлением в 760 мм., нужно найденный объем помножить на $H - \frac{N}{13,5}$ и разделить на 760. Например: если нашли, что объем газа, при давлении атмосферном в 753,0 мм. при высоте воды 72,3 миллиметра, равен 45,6 кубическим сантиметрам — требуется узнать объем газа под давлением в 760 мм. (при той же температуре). Этот объем будет $45,6. \frac{753,0-5,4}{760} = 44,85$. Нормальное давление принимается в 760 миллиметров, конечно, условно; но это такое условие, которого обыкновенно держатся во всех научных исследованиях. Должно заметить при этом, что высота в 760 мм. означает высоту, свойственную барометру, если бы температура ртути была 0°; если же температура ртути будет выше, то эта же высота будет отвечать меньшему давлению, потому что, чрез нагревание, ртуть расширяется и становится легче, а потому нужно непременно приводить наблюдаемую высоту ртути к такой, которую бы она занимала при 0°. Положим, что имеем высоту ртути H при температуре t°, то при температуре 0° высота ртутного столба будет $\frac{H}{(1 + 0,00018\ t)}$; потому-то и должно различать, в строгих исследованиях, кажущееся давление, наблюдаемое в барометре, от истинного, вычисляемого по кажущемуся давлению и температуре ртути. Если мы, впоследствии, будем говорить когда нибудь об давлении газа, то всегда будем предполагать, что это давление приведено к давлению ртутного столба при температуре 0°.

Газы характеризуются весьма большим и однообразным расширением от повышения температуры. Увеличение одного объема газа, с повышением температуры на один градус (Ц), называется коэффициентом расширения газа. Коэффициент расширения для газов, если не совершенно тождествен, то весьма мало изменяется и с температурою, и с переменою свойств газа. Все газы, приблизительно на один градус, расширяются на 0,00366; следовательно, один объем газа, измеренный при температуре t, будет занимать, при температуре T, объем $1 + 0,00366\ (T - t)$.[1] Единица, деленная на 0,00366, равна почти 273, а потому 273 объема газа, измеренные при 0°, увеличиваются на 1 объем на каждый градус Цельзия; поэтому при +273° объем газа увеличивается в два раза, а при —273° он должен был бы уменьшиться до 0, если бы закон расширения был совершенно точен. От того-то темпера-

[1] Точнее этот объем $= \frac{1 + kT}{1 + kt}$, где k есть коэффициент расширения, но сокращая и пренебрегая малыми разностями, получим $1 + k(T-t)$.

тура — 273° и называется абсолютным нулем. Объем газа, равный v при 0°, будет занимать при температуре t° объем $v(1+0{,}00366t)$ или $v\frac{273+t}{273}$. Правило относительно изменения объемов с температурою носит название закона Гей-Люссака, потому что этот французский исследователь открыл правильность в расширении газов. Но ни закон Гей-Люссака, ни закон Мариотта, в сущности, не совершенно точны. Как коэффициент расширения, так и изменение объемов с давлением, не подчиняются вполне двум вышеозначенным законам; но отступления столь незначительны, что в большинстве исследований, совершаемых с газами и парами, возможно пренебречь замечаемыми отступлениями от этих законов, не отступая далеко от истины. Но конечно, в самых точнейших исследованиях и эти небольшие отступления должно принимать во внимание. Если предполагается, что *правила* Мариотта и Гей-Люссака справедливы, то газ называется совершенным. По мере повышения температуры и уменьшения давления, газы приближаются к совершенному состоянию. Совершенное состояние газа выражается следующим условием:

$$H \cdot V = M \cdot (273 + T),$$

где H выражает давление, V — объем, T — температуру и M — постоянную величину, характерную для каждого газа (и зависящую от основных свойств его частиц). Этот закон выражает, что $\frac{H \cdot V}{273+t}$ или $\frac{H \cdot V \cdot k}{1+kt}$ есть постоянная величина (где k есть коэффициент расширения). Для нахождения этого закона, возьмем данное количество газа, измерим его объем V при T и H и потом объем v при t и h. По законам вышеприведенным:

$$V : v = \frac{h}{1+kt} : \frac{H}{1+kT}$$

откуда находим, что

$$\frac{V \cdot H}{1+kT} = \frac{vh}{1+kt}$$

или же

$$\frac{V \cdot H}{273+T} = \frac{vh}{273+t};$$

так как при всех возможных значениях v, h и t равенство будет существовать, то вторую часть можно признать постоянною и равною M, что и выражено в формуле. Точнее (но не вполне) эта формула выражается так:

$$\frac{H \cdot (V+a)}{1+bH} = M\,(273+T).$$

Значение коэффициентов a, b и M изменяется с природою газа, например, для водорода $= 0{,}029$, $b = 0{,}000000296$ и $M = 421{,}04$.

Руководствуясь соединением двух вышеназванных правил, всегда есть возможность, на основании наблюденной температуры газа и

того давления, под которым он находится, узнать объем, который займет газ при 0° и 760 мм. давления; если чрез v означаем объем газа при температуре t° и при давлении h, то объем v_0 газа при 0° и 760 мм. давления будет:

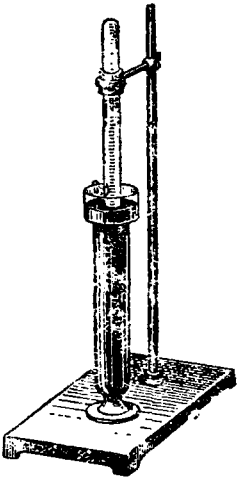
$$V_0 = \frac{V \cdot h}{(1 + 0{,}00366\,t)\,760} \text{ или } \frac{V \cdot h \cdot 273}{(273 + t)\,760} \text{ или } \frac{V \cdot h}{273 + t} \cdot 0{,}36.$$

Обыкновенно к этим условиям 0° и 760 мм. относят все измерения газов для того, чтобы возможно было их сравнивать между собою. Если дан объем V_0 при 0° и 760 мм., то при t° и h мм. объем будет $\frac{V_0(273 + t)}{h \cdot 0{,}36}$.

Должно заметить, что газы затруднительно взвешивать, потому что они легки; требуется много предосторожностей и весьма большую тщательность для того, чтобы производить прямое взвешивание их, а потому, при исследовании газов, их обыкновенно не взвешивают, как твердые и жидкие тела, а измеряют их объемы и измеренные объемы сравнивают, переводя на объемы при 0° и 760 мм. давления. Для того чтобы измерять объемы газов, употребляются цилиндры, деленные на кубические сантиметры или же деленные по высоте на линейные миллиметры. В этом последнем случае для каждой трубки, предварительно определяют объем, соответствующий миллиметрическому делению трубки.[1] Выгода употребления приборов с миллиметрическими делениями состоит в том, что они дают возможность прямо наблюдать разность давления газа, заключенного в трубке, с атмосферным, судя по разности высот жидкости в трубке и в сосуде, в котором она поставлена, или в так называемой ванне. Для манипуляции с газами такие трубки наполняют предварительно соответственной жидкостью, например, водою или ртутью, потом свободный конец трубки запирают или стеклянною пластинкой, когда отверстие трубки широко и пришлифовано, или просто пальцем, если трубка узкая, и перевертывают запертую трубку, погружая запертый конец ее в сосуд с жидкостью, или в так называемую ванну; тогда открывают пластинку или палец, и жидкость остается в трубке, если высота ее не будет больше барометрической. В этом положении, изображенном на фигурах, вводят в трубку газ, который, по своей легкости, занимает верхнюю ее часть. Тогда возможно измерять объем газа и узнать давление, под которым он находится. Оставляя трубку с газом при обыкновенной температуре некоторое время и замечая, что объем газа не изменяется, можно судить, что газ принял температуру окружающего воздуха. Если же желают иметь газ определенной температуры, то окружают трубку другою и в пространство между стенками обеих трубок наливают воду, температуру которой газ и принимает, а потому, определяя температуру воды, можно знать и температуру газа, находящегося в приборе. Чтобы

[1] Соотношения между делениями (то есть длинами) трубок и их объемами (ёмкостями) называются калиброванием. Желающие знать подробности этого вопроса могут найти их в Аналитической химии, издаваемой мною, в количественном анализе, Выпуск 2-й, С. Петербург, 1866 года и, во многих физических исследованиях.

судить об объеме газа, находящегося в трубке, необходимо иметь трубки с делениями на меры кубической вместимости. Обыкновенно деления на всех таких сосудах относят к кубическим сантиметрам и их долям, что и узнается, вливая в трубку жидкость и определяя ее объем, по ее весу и плотности. Для определения давления необходимо иметь на стенках трубки, кроме того, деления миллиметрические, чтобы можно было определить высоту жидкости в трубке и чрез то исправить барометрическую высоту. Лучше всего когда оба рода делений начерчены на трубке, но должно предпочитать деления миллиметрические, потому что деления по емкости, во всяком случае, должно проверить по весу жидкости, а потому и можно составить табличку (для каждого отдельного прибора) соотношений миллиметрических делений с делениями по емкости.



Фиг. 28. Цилиндр, деленный по емкости, заключающий газ и помещенный открытым концом в стакан с ртутью, что служит для сохранения газа в закрытом со всех сторон пространстве.

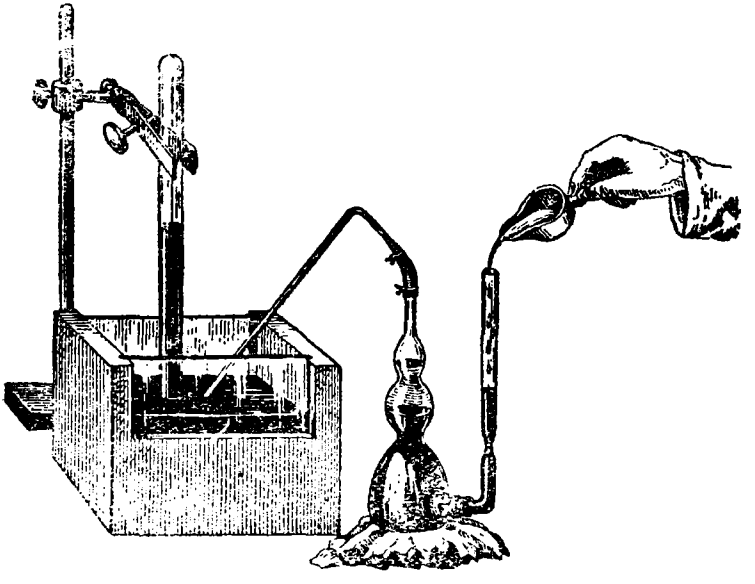
Чтобы судить по объемному количеству газа об его весе, необходимо знать вес одной кубической меры газа; обыкновенно, впрочем, дается не вес одной кубической меры газа, а его плотность, то-есть отношение между весами данной кубической меры газа и воздуха; так, например, если говорят, что газ, употребляемый для освещения, имеет плотность 0,6, то это значит, что равные объемы воздуха и светильного газа, измеренные при одинаковых давлениях и при одной и той же температуре, относятся между собою, как 1 : 0,6 или как 10 : 6. Определение плотности газа основывается на прямом взвешивании данного объема газа; но оно сопряжено с такого рода подробностями, которых нет возможности здесь изложить, а потому желающие могут отыскать необходимые данные в сочинении, указанном внизу страницы 38-ой [=72]. Если газ имеет плотность a, то вес одного кубического сантиметра этого газа может быть узнан, помножая эту плотность на вес одного кубического сантиметра воздуха при той же температуре и том же давлении. Обыкновенно плотности и вес одного кубического сантиметра воздуха даются при температуре 0° и давлении 760 мм.; правда, что плотности газов не изменяются с температурою, потому что газы расширяются так же, как и воздух, но это только приблизительно; в сущности же все-таки маленькие изменения в плотности газа происходят с температурою, а иногда эти изменения с температурою, как мы увидим впоследствии, бывают значительны. Вес одного кубического сантиметра воздуха, при 0° и 760 мм., равен 0,001293 граммам, при температуре t° и давлении h он равен

$$\frac{0{,}001293\,h}{(1 + 0{,}003665\,t)\,760}.$$

На основании этого легко узнать вес одного кубического сантиметра газа при какой угодно температуре и давлении; например, если плотность светильного газа равна 0,6, то, при температуре 20° и при давлении 800 мм., вес одного кубического сантиметра этого газа выразится чрез

$$0{,}6 \cdot \frac{0{,}001293 \cdot 800}{(1 + 0{,}00366520)\,760}.$$

Чтобы для выражения плотностей газов не иметь величин, меньших единицы, полезно избрать для сравнения газ наименее плотный. Такой газ есть водород. Он около в $14^1/_2$ раз легче воздуха. Один кубич. санти-



Фиг. 29. Способ перевода газа в цилиндр со ртутью, погруженный, как на фиг. 28, открытым концом в ртуть, налитую в ящик с двумя стеклянными стенками. Направо виден прибор, содержащий газ. Верхний конец его снабжен трубочкой, идущей под колокол. Дно сосуда снабжено восходящей трубкой. Если в нее наливать ртуть, то давление газа в приборе увеличится и он, чрез газопроводную трубку, перейдет в цилиндр и займет место в верхней его части, где его можно измерить.

метр его, при 0° и 760 мм., весит 0,0000896 грамма или литр 0,0896 грамма. Такой выбор имеет много преимуществ. Важнее всего то, что воздух изменяется в разных обстоятельствах в своей плотности, а водород неизменен. Если дана плотность по отношению к воздуху, то легко найти ее по отношению к водороду; стоит только разделить на 14,44 или помножить на 0,06927.

Газы характеризуются не только своею плотностью, от которой зависят многие свойства газов (например, как видели выше, быстрота

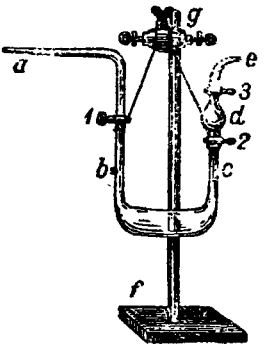
смешения и прохождения чрез тонкие отверстия, также многие теплотные, световые и др. отношения), но и многими другими особенностями. Самая существенная из этих особенностей состоит в том, что многие газы, а, вероятно, и все при усиленном давлении и пониженной температуре превращаются в жидкость. Правда, что некоторые газы до сих пор не удалось превратить в жидкость не смотря на значительное давление и сильное понижение температуры, употребленные для этого. Газы последнего рода называются постоянными газами; воздух может служить их примером. Другие газы, напротив того, более или менее легко превращаются в жидкости. Температура, при которой под обыкновенным давлением газ превращается в жидкость, для разных газов весьма неодинакова. Газами называют вообще такие тела, которых температура превращения в жидкость лежит гораздо ниже обыкновенной температуры. Такие газы, которых температура сгущения в жидкость есть температура обыкновенная, или выше ее, называются парами. Между парами и газами нет никакого различия, кроме температуры сгущения в жидкость. Около этой температуры газообразные и парообразные тела имеют особые свойства и уже не следуют столь точно, как вдали от этих температур, правилам Гей-Люссака и Мариотта, и потому представляют в своих свойствах некоторые особенности. Здесь нужно прежде всего различать пары насыщающие и не насыщающие пространство, то-есть перегретые и разреженные. Всякая летучая жидкость выделяет из себя пар или газ в воздух, или в безвоздушное пространство; но в ограниченное пространство воздуха или газа может вмещаться, при данной температуре, только определенное количество пара, потому что, при увеличении количества пара, вмещающегося в пространстве, увеличивается и давление его, следовательно, часть пара и может, чрез увеличение давления, превращаться в жидкость, и потому всем летучим жидкостям, при каждой температуре, свойственно определенное давление паров. Это есть наибольшее давление, которого может достигнуть пар жидкости при определенной температуре; при высшем давлении и той же температуре, пар уже превращается в жидкость; следовательно, при данной температуре давление не может достигнуть больше известной наибольшей величины. Температура кипения есть именно та температура, при которой давление паров жидкости равно атмосферному; при температурах низших кипения, давление паров менее атмосферного, а при температурах высших оно более атмосферного; так, например, температура кипения воды 100° (Ц), то-есть при этой температуре, при нормальном давлении в 760 мм. вода кипит или давление водяного пара при этой температуре равно 760 миллиметрам; при температуре 90° оно равно только 525,450 мм.; при температуре 50° — 91,982 мм.; при 0° — 4,600; при 120,6° оно = 2 атмосферам = 2 · 760 = = 1520 мм.; при 152,2° = 5 · 760 = 3800 мм.

Но пар и газ могут при данной температуре и не насыщать пространства, если будут иметь меньшее давление, чем то наибольшее давление паров, какое свойственно жидкости при этой температуре. Тогда пар будет разреженный, то-есть, при малом увеличении давления нисколько жидкости не образуется из пара и, следовательно, пар будет

представлять свойства газа. Если пар, полученный из кипящей жидкости, мы подвергнем дальнейшему нагреванию, то пар также не будет насыщать пространства и также не будет выделять жидкости при первом увеличении давления или при малом понижении температуры, а потому будет представлять также свойство газа; а потому, собственно говоря, паром можно называть газ или пар, насыщающий пространство; газы же или пары, не насыщающие пространства, имеют свойство газов изменяться в объеме от давления и температуры; пар же, насыщающий пространство, при охлаждении или увеличении давления выделяет из себя жидкость. Когда, при увеличении давления без изменения температуры, выделяется жидкость, давление не изменяется; а при понижении температуры, если часть пара превратится в жидкость, давление уменьшается. Таким образом, говоря об газах, нужно не забывать той связи, какая существует между газообразным, парообразным и жидким состояниями. Для различных газообразных тел это соотношение весьма неодинаково и характеристично. Постоянным газом называется такой, который не удалось до сих пор превратить в жидкость или сгустить никаким давлением и никаким понижением температуры. Должно полагать, что всякий газ и пар, при повышении температуры и уменьшении давления, должен становиться совершенным (см. стр. 37=71); при некоторой степени давления и температуры изменение его свойств должно сделаться таким, что к нему в точности будут прилагаться законы Гей-Люссака и Мариотта; но таких идеальных газов или вполне совершенных, подчиняющихся в точности этим законам, до сих пор мы не знаем, должны их воображать, когда составляем представление об газе.

Из сказанного выше ясно следует, что для сгущения газа в жидкость иногда достаточно одного охлаждения. Таков, например, сернистый газ, образующийся при горении серы и представляющий всем известный характерный запах, распространяющийся при горении серы. Достаточно охладить его до —11°, чтобы он превратился в жидкость, которая кипит при —10°Ц. В таких случаях сгущение газа производится очень легко. Стоит газ пропускать чрез трубку, помещенную в охладительную смесь, имеющую надлежащую низкую температуру, чтобы сгустить газ в жидкость. Заметим здесь, что открытие легкой способности некоторых газов переходить в жидкости было предугадано, потому что, при низких температурах, изменение объемов для них происходило быстрее, чем для других газов. Для других газов недостаточно одного охлаждения для превращения в жидкость, по крайней мере тех низких температур, которые легко получаются при содействии охладительных смесей, например смеси льда с солью и т. п. В этих случаях, для сгущения газа в жидкость стремятся, единовременно, понизить температуру и увеличить давление. Первое тем необходимее, что при сгущении газов отделяется теплота, а потому прибор, служащий для увеличения давления или для сжимания газов нагревается. Охлаждение производят, окружая льдом сосуд, в котором сжимают газ. Этот последний сосуд должен быть массивен и сделан из весьма вязкого материала, например, железа, меди и т. п., а не из хрупкого,

как, например, чугун, стекло и т. п., потому что, при сжатии газа, давление его увеличивается, тонкий и хрупкий сосуд может разорваться. В такой сосуд, снабженный металлическим клапаном,[1] позволяющим газу входить, а не выходить из прибора, накачивают нагнетательным насосом газ. Тогда, когда давление повысится до наибольшего — возможного, соответствующего данной температуре и взятому газу, этот последний переходит в жидкость. На фигуре изображен рисунок прибора, служащего для такого сгущения. Когда в сосуде накопится достаточно жидкости, его отнимают от насоса, и тогда, отворив кран, каким снабжен сосуд, назначенный для сжатия, можно выпустить образовавшуюся жидкость. Раз сгущенный в жидкость, газ удерживает это состояние довольно долго, потому, во-первых, что для обратного перехода в газ такой жидкости нужно поглотить тепло, а окружающая среда может дать его ограниченное количество, а во-вторых, потому, что чрез испарение образовавшейся жидкости, температура ее самой и окружающего пространства быстро понижается и чрез то давление паров уменьшается Это понижение температуры происходит еще быстрее, если выливать сгущенный газ тонкою струею (чтобы увеличить быстроту испарения и понизить чрез то температуру) или перенести жидкость под колокол воздушного насоса. При этом иногда остальная (не испарившаяся) часть жидкости переходит в твердый вид, в котором сохраняется еще лучше. Так сгущают многие газы, особенно же часто углекислый газ, образующийся при горении угля, и закись азота. Посредством этих сгущенных газов можно получить весьма низкие температуры, соответствующие низким температурам кипения и плавления сгущенных газов. Углекислый газ сгущается, если объем его сдавить при 0° в 36 раз, то есть, при давлении в 36 атмосфер при 0°. Это значит, что в сгущенном виде углекислый газ при 0° может иметь давление пара, равное 36 атмосферам или 36 · 760, т. е. 27360 миллиметров ртутного столба. Это значит также, что углекислый газ при 0°, при каком угодно сжатии, не может иметь давление более 36 атмосфер.

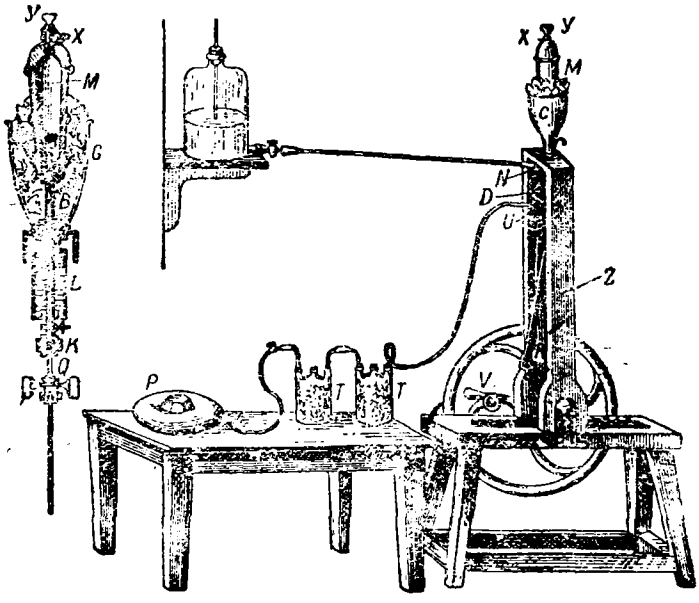


Фиг. 30. Прибор для сгущения сернистого газа. Чрез трубочку *a* вводят этот газ, отворив краны. Часть *bc* погружают в смесь снега и поваренной соли. В ней сгустится сернистый газ в жидкость. Тогда, закрыв краны 1 и 2, можно сохранять сгущенную жидкость и при обыкновенной температуре. Если требуется отлить часть ее, то кран 3 затворяют, отворяют 2, прибор наклоняют, жидкость вольется в часть *d*, затворяют кран 2 и тогда можно чрез кран 3 и носок *e* вылить жидкость из части *d*.

Кроме отношения к переходу в жидкость и плотности, газы характеризуются своими отношениями к нашим органам, то есть, цветом,

[1] Кожаный, каучуковый и т. п. клапаны могут загораться и изменяться от повышения температуры, происходящего чрез сжатие газа, особенно, если сгущаемый газ поддерживает горение.

запахом, вкусом и т. д.; но эти признаки, так называемые *органолептические*, как и для твердых и жидких тел, не могут быть подведены под систему, могут составлять только, так сказать, внешние признаки, не подлежащие мере и весу, а потому не точные.



Фиг. 31. Прибор для получения жидкой закиси азота или углекислоты. Слева мешок *P*, сделанный из каучука, его наполняют газом. Он будет выходить из мешка от давления гири, на него положенной. Газ проводят чрез сосуды *T*,*T* для высушивания, далее газ входит по трубке в насос *B* (виден в разрезе верхней части прибора, изображенном налево). Поршень нагнетательного насоса двигается шатуном *R* и рукояткою с маховиком *V*. Из под поршня, при его движении вверх, газ вталкивается в железный сосуд *M*, где и сгущается. Клапан *S* позволяет газу входить, но не выходить из этого сосуда. Для охлаждения сосуд и насос окружены воронкой *G* со льдом и водою, добавляемою из сосуда, видного слева. Когда газ сгустится, что узнается по прибыли веса пустого сосуда, сосуд *M* отвинчивают от насоса и сгущенную жидкость можно выливать, опрокинув сосуд и открывая винтовой кран *Y*. Тогда жидкость выливается чрез трубочку *X*.

Парообразное состояние в виде насыщенного пара представляет как бы переход от жидкого к газообразному, как коллоидальное, мягкое и порошкообразное состояния представляют переход от твердого состояния к жидкому. В этом отношении особенно поучительно то, что при известной температуре всякая летучая жидкость, несмотря на

малый объем пространства, переходит вполне и вдруг в пар. Если обыкновенный эфир (входящий в гофманские капли) влить в тонкую стеклянную трубку (с толстыми стенками, потому что давление внутри будет большое) и, запаяв последнюю, нагреть до 180°, то, несмотря на малость пространства, весь эфир перейдет в пар. Для каждой жидкости есть своя такая температура. Так, для воды эта температура будет около 600°, для спирта 250°, для хлористого кремния = 230°. Я называю такие температуры — абсолютными температурами перехода в пар. При них никакое давление не в состоянии перевести пар в жидкость.

Весьма характерно, что эти абсолютные температуры соответствуют тем температурам, при которых сцепление жидких частиц уничтожается (оно уменьшается при нагревании) и при которых, по этой причине, они не поднимаются в капиллярных трубках, как показали исследования Каньяр-Латура, Вольфа и мои. Отсюда ясно, что газ и пар есть жидкость без сцепления и что пар есть переходная форма от жидкой к газообразной. Если мы различаем три состояния тел, то этим хотим обозначить главнейшие превращения в основных свойствах. Состояний, если угодно, много, но типических три. Состояние тела и признаки, его характеризующие, в каждом состоянии составляют первую и самую существенную характеристику для каждого однородного тела. Если тело переходит во все три состояния, при разных условиях температуры и давления, то характеристика тела облегчается, понятие об нем расширяется, и такие однородные тела приобретают для нас тем важнейшее значение, что число их сравнительно не очень велико. Должно заметить, что изучение таких тел, которые переходят во все состояния, облегчается чрез возможность по произволу менять состояние тела, и потому такие тела исследованы во всех отношениях гораздо более, чем те из тел, которые до сих пор не удалось иметь иначе, как в одном только состоянии. Вода, переходящая в твердый лед, снег и в газообразный пар, представляет лучший пример из всех обыкновенных тел того разряда их, для которого известны все три состояния. Железо, медь известны только в твердом и жидком виде; некоторые маслянистые вещества только в жидком виде; воздух — только в газообразном; и эти последние менее известны нам во многих отношениях, чем те, которые легко меняют свое состояние; в особенности же затруднительно изучение таких тел, которые не переходят в газообразное состояние.

Пары и газы характеризуются простотою своих отношений к различным деятелям, так сказать, простотою в распределении частей, предельным физическим состоянием вещества и потому составляют такую форму его, в которой легче всего отыскивается простота отношений и законность их. Мы увидим впоследствии, что в химическом отношении исследованы наиболее те вещества, которые способны переходить в газ или пар; об них наши сведения всего яснее и для них удалось отыскать законы и простые отношения, которые, при всем усилии исследователей, не могли еще быть отысканы по сих пор для тел твердых и жидких.

Четвертая глава

О соединениях воды и особенно о растворах

Растворимость газов

(стр. 137—140)

Вода растворяет не только твердые и жидкие тела, но и газы, впрочем многие в малой мере, но некоторые в значительной. Для последних очень легко наблюдать растворимость в воде. Возьмем цилиндр, наполненный, например, аммиачным газом и поставим его в ртутную ванну. Если впустить в цилиндр воды,[1] то ртуть будет подниматься, потому что вода растворяет аммиачный газ. Если столб поднимаемой ртути не велик и количество воды достаточно для растворения газа (а именно не менее $\frac{1}{660}$ противу объема газа при обыкновенной температуре), то весь газ поглотится водою. Здесь видно ясное и значительное сродство воды к аммиачному газу. Такие случаи значительной растворимости газов в воде представляют особенные явления, чем те случаи, когда газ мало растворим. К последнему разряду относится большинство газов и, строго говоря, нет ни одного газа, совершенно нерастворимого в воде. Количество газов, могущих растворяться в одном объеме воды, изменяется с природою газа, с температурою и давлением. Эти изменения определяются следующими тремя общими правилами: 1) Газы, которые легко сгущаются в жидкости (при охлаждении и сжатии), более растворимы, чем постоянные, не сгущаемые. Так, в 100 объемах воды растворяется при 0° и 760 мм. только 2 объема азота и водорода, 4 объема кислорода, 3 объема окиси углерода, и т. д. ибо это суть газы несгущаемые, а углекислого газа растворяется 180 объемов, закиси азота 130, сернистого водорода 437 и т. д., ибо эти газы довольно легко сгущаются в жидкости. Оно и понятно. Растворение газа есть своего рода превращение в жидкость, что видно из того, что оно сопровождается отделением тепла, а потому газы, легче других превращающиеся в жидкости, и легче растворяются. 2) При нагревании растворимость газа уменьшается, что легко понять из предыдущего — упругость газа становится больше, он удаляется от перехода в жидкость. Так 100 объемов воды растворяют при 0° 2,5 объема воздуха, а при 20° только 1,7 объема. По этой-то причине холодная вода, внесенная в теплую комнату, выделяет пузырьки газа, которые обыкновенно пристают к стенкам сосуда. Точно также каждый может наблюдать образование пузырьков, когда свежую воду нагревают. 3) Количество



Фиг. 41.

[1] Чтобы ввести в цилиндр воду, употребляют стеклянную пипетку, изображенную на фигуре. Загнутый нижний конец ее вставляют в воду и всасывают воздух из верхнего конца. Когда вода наполнит пипетку, верхний конец ее запирают пальцем, а нижний вводят в ртуть ванны так, чтобы загнутый конец был в отверстии цилиндра. Тогда или от давления водяного столба (если ртуть стоит в колоколе не высоко), или от вдувания воздуха в пипетку, вода из нее будет выходить в цилиндр и поднимется по своей легкости на поверхность ртути.

растворяющегося газа уменьшается с давлением во столько раз, во сколько уменьшается самое давление. Это правило называется законом Генри-Дальтона. Поэтому газ, растворенный в воде, выделяется из нее в безвоздушном пространстве. А вода, насыщенная при сильном давлении газом, выделяет часть его, если будет подвержена меньшему давлению. Так, многие минеральные источники насыщаются под землею углекислым газом под сильным давлением поднятого над ними столба воды. Выходя на землю, они кипят и пенятся, выделяя избыток растворенного в них газа. Тем же газом под давлением насыщаются шипучие вина и воды. Они содержат газ, пока находятся в плотно закупоренных сосудах. Когда открывают пробку и жидкости приходят в соприкосновение с воздухом, имеющим меньшее давление, то часть газа, не могущая оставаться в растворе при меньшем давлении, выделяется с шипением в виде пены, известной каждому.

Растворимость газов в воде. Коэффициент растворения газов в воде изменяется не только с температурою воды и с природою газов, но также и при изменении давления и, что весьма важно, при изменении содержания растворяющегося газа в той атмосфере, которая окружает воду, служащую для растворения. Так как применение растворимости газов в воде встречается весьма часто не только в химической практике, но и при исследовании различных физиологических и других научных вопросов, то мы постараемся дать здесь краткий очерк тех законов, которыми управляется растворение газов в воде и следствий, из того вытекающих. Заметим первоначально, что первым и самым существенным признаком того, что данное поглощение газа водою (или какою либо другою жидкостью) представляет явление растворимости, а не другого вида химического притяжения, первым признаком для этого, может служить изменение растворимости газа с изменением давления, под которым происходит такое растворение. Растворимость газа в воде изменяется пропорционально давлению, то-есть, при двойном давлении, $2h$, в данном количестве воды растворяется двойное количество газа сравнительно с тем, что растворяется при простом давлении h.

Под количеством газа разумеется здесь или вес его или объем, измеренный при нормальных (или вообще определенных) давлении и температуре. Но так как газ изменяет свой объем пропорционально давлению, то объем газа, растворяющийся в известном объеме воды, остается неизменным, какое бы давление ни имел газ. Если в 100 объемах воды при 0° растворяется 4 объема кислородного газа, то это значит, что при давлении, например, 1 атмосферы растворится 4 объема, измеренных при том же давлении; при давлении 2 атмосфер — 4 объема, измеренных под этим же давлением, или 8 объемов, если газ измерять под давлением 1 атмосферы. Под давлением 0 атмосфер, или в безвоздушном пространстве, значит, в воде не растворится газов. Некоторые газообразные вещества способны соединяться с водою и поглощаются, следовательно, ею не по законам растворимости газов, а вследствие химического притяжения или вследствие образования прочного химического соединения воды с газом. В этом последнем случае изменение растворимости с давлением не следует тем простым законам, которым подчиняется простая растворимость. Поглощаемый газ удерживается с большою энергиею в массе воды или другой взятой жидкости и с уменьшением давления не выделяется из нее или выделяется только в уменьшенном количестве противу того, какое соответствует уменьшению давления. При уменьшении давления вдвое, выделяется не половина всего газа, содержащегося в растворе, а только, может быть, $^1/_3$, $^1/_4$ и т. д. Эти последние случаи не относятся уже непосредственно к тем, которые мы будем рассматривать теперь. Но, так как не существует резкой границы между теми случаями растворимости, о которых мы будем говорить, и теми, о которых тотчас было упомянуто, то это ясно показывает, что между такого рода соединениями, какие происходят при растворении, и соединениями, гораздо более прочными, нельзя положить резкой границы. Примером прочного соединения газа с водою может служить растворение аммиачного газа в воде или растворение хлористоводородного газа в той же

жидкости. Прилагаемая таблица показывает, на сколько изменяется количество растворимого газа в этих случаях с изменением давления.

Давление в миллиметрах ртути	Количество граммов аммиака, растворяющихся в 100 гр. воды при 0°	Количество граммов хлористого водорода, раств. в 100 гр. воды при 0°
100	28,0	65,7
500	69,2	78,2
1 000	112,6	85,6
1 500	165,6	—

Можно привести не мало примеров и таких случаев поглощения газов жидкостями, которые вовсе не представляют никакого видимого соотношения с явлением растворимости. Так, например, углекислый газ поглощается раствором аммиака в воде и из этого раствора уже не выделяется углекислый газ с понижением давления, или еще лучше, хлористоводородный газ поглощается раствором аммиака в воде, не выделяясь вовсе потом с уменьшением давления.

Но есть целый разряд явлений поглощения газов жидкостями, которые характеризуются именно тем, что количество растворимого газа прямо пропорционально давлению, под которым происходит растворение. Это служит признаком для явлений простых растворений, о которых мы будем теперь говорить. Так, например, этим путем можно было доказать, что растворение кислородного газа в крови, или, правильнее сказать, поглощение кислорода кровью в легких из вдыхаемого воздуха не составляет явления простого растворения, потому что этот поглощаемый кислородный газ удерживается кровью при уменьшении давления и выделяется из нее в этом обстоятельстве только в гораздо меньшем количестве, чем следует сообразно с уменьшением давления. Дальнейшие исследования показали действительно, что в крови находится вещество, которое прочно удерживает кислород, поглощаемый кровью, образует с ним, хотя не очень прочное, но, все-таки, химическое соединение, гораздо более прочное, чем обыкновенно происходит при образовании растворов. Итак, прежде всего следует решить, в каждом данном случае поглощения газов, представляет ли этот случай явление истинного растворения, или здесь замечается явление более прочного химического соединения. Для этого должно произвести опыт растворения под известным давлением, определить при этом количество газа, растворившегося во взятом объеме жидкости, а потом, не изменяя ни одного из прочих условий, от которых зависит растворение, переменить только одно давление, например, уменьшить его в 2, 3, 4 раза. Если данный случай есть случай простого растворения, то тогда, соответственно этому уменьшению давления, в растворе остается $^1/_2$, $^1/_3$ или $^1/_4$ того количества газа, которое было растворено первоначально.

Закон парциальндго давления и его применение

(стр. 147—151)

Все предыдущее, сказанное о законах растворимости, относится к тому случаю, когда один растворяющийся газ приведен в прикосновение с водою или другою жидкостью. Тогда все давление, свойственное газу, принадлежит ему и он растворяется под этим всем давлением, измеренным манометром или высотою барометра. Но встречается, и весьма часто, такой случай, когда находится смесь газов. Спрашивается, какова будет растворимость в этом последнем случае; будет ли растворимость одного газа препятствовать растворению в воде другого газа, произойдет ли вытеснение одного газа другим или будет существовать правильное соотношение между отношением газов в смеси и их степенью растворимости? Эти вопросы разрешают, так называемым, законом частного или *парциального давления* и применяются, как и вышеприведенные законы, только к случаю насыщения жидкости газом. Закон парциального давления состоит в том, что растворимость газов, находящихся в смеси с другими, происходит под влиянием не всего того давления, которое имеет газовая смесь, но под влиянием той части давления,

которая приходится на данный газ, сообразно объемному содержанию этого газа в смеси; так, например, если бы кислород, азот и углекислый газ были смешаны между собою в равных количествах и представляли бы давление 760 мм., то вода растворила бы каждого из этих газов столько, сколько бы растворилось, если бы каждый из этих газов имел давление, равное $^1/_3$ атмосферного, а именно в этом случае, при 0°, один куб. сант. воды растворил бы 0,014 куб. сант. кислорода, 0,007 куб. сант. азота и 0,60 куб. сант. углекислого газа. Если давление газовой смеси равно h и в n объемах газовой смеси находится a объемов данного газа, то его растворение будет происходить, как будто бы этот газ растворился под давлением $\frac{h \cdot a}{n}$. Та часть давления, под влиянием которой происходит в действительности растворение, и называется парциальным давлением.

Чтобы представить себе причину закона парциального давления, должно припомнить только основные свойства газов. Газы упруги. Их частицы движутся, ударяются о преграды и тем производят давление. Чем больше частиц газа ударяет в данное время о преграду, тем больше давление. Растворение, поглощение газа зависит от той же причины. Ударяясь о жидкость, часть газа входит в самую жидкость и удерживается в ней до тех пор, пока другие газовые частицы ударяют об жидкость, давят на нее, как говорят. Если общее давление газовой смеси велико, от этого число ударов газа, входящего в смесь, не увеличивается. Для растворимости газа, для числа его ударов о поверхность жидкости будет все равно, будут ли рядом с ним ударять другие частицы газов или их вовсе не будет. Поэтому растворимость данного газа будет пропорциональна не всему давлению газовой смеси, а той части его, которая приходится на данный отдельный газ.

Следствия из этого закона парциального давления чрезвычайно многочисленны и важны, а потому мы над ними и остановимся с некоторою полнотою, но предварительно приведем тот обыкновенный случай, который встречается в природе всюду. Все жидкости в природе находятся в соприкосновении с воздухом. Воздух, как мы увидим впоследствии подробнее, есть смесь между собою газов, преимущественно четырех: кислорода, азота, углекислого газа и водяного пара. В 100 объемах воздуха, приблизительно, содержится 79 объемов азота и около 21 объема кислорода; объемное количество углекислого газа не превышает 0,05. В обыкновенном случае количество водяного пара гораздо значительнее, но изменяется с влажностью воздуха. Следовательно, растворение азота в жидкостях, прикасающихся с воздухом, будет происходить под парциальным давлением, равным $\frac{79}{100} \cdot 760$ мм., если было атмосферное давление, равное 760 мм., следовательно, под давлением около 600 мм. ртутного столба, растворение кислорода под давлением около 160 мм., углекислого газа — только под давлением весьма малым, а именно около 0,4 миллиметра. Потому, хотя растворимость кислорода в воде в два раза больше, чем растворимость азота в воде, но в воде будет растворено гораздо менее кислорода, чем азота, потому что парциальное давление первого гораздо менее второго. Можно легко вычислить, какое именно количество каждого из газов будет заключаться в воде, а именно, возьмем простейший случай и вычислим, сколько при 0° и 760 мм. давления будет растворяться кислорода, азота и углекислого газа из воздуха, имеющего вышеприведенный состав. Под давлением 760 мм. 1 куб. сант. воды растворяет 0,0203 куб. сант. азота, а под парциальным давлением 600 мм. растворит $0{,}0203 \frac{600}{760}$ или 0,0160 куб. сант.; кислорода $0{,}0411 \frac{160}{760}$ или 0,0086 куб. сант., углекислого газа $1{,}8 \frac{0{,}4}{760}$ или 0,00095, следовательно, в куб. сант. воды будет содержаться, при 0°, всего 0,0255 куб. сант. газов воздуха, и 100 объемов их будут содержать около 62% азота, 34% кислорода и 4% углекислого газа. Таков должен быть состав воздуха, растворенного в воде. Вода содержит обыкновенно больше углекислого газа. Он происходит от разрушения углеродистых веществ, попадающих в воду.

Законом парциального давления определяются многие явления, замечаемые над растворами газов. Какой бы газ ни был растворен в воде, в атмосфере другого газа этот газ выделяется из раствора. Это зависит от того, что в безвоздушном про-

странстве газ, растворенный в воде, выделяется из нее, ибо давление ничтожно. Такою же пустотою служит для газа, растворенного в воде, атмосфера другого газа. Выделение происходит от того, что частицы растворенного газа не ударяют уже более об жидкость, не растворяются в ней, а бывшие в растворе по упругости своей выходят из жидкости. Здесь может быть собственно два случая: или атмосфера, окружающая раствор, ограничена, или относительно весьма велика, то есть безгранична, как например, воздушная атмосфера на поверхности земли. Если атмосфера другого газа, в которую внесен газовый раствор, ограничена, например, закрытый сосуд, то часть газа, содержащегося в растворе, выделяется и таким образом переходит в атмосферу, окружающую раствор и будет оказывать парциальное давление. Представим, например, себе, что вода, насыщенная углекислым газом при 0° и обыкновенном давлении, введена в атмосферу газа, не поглощающегося водою и именно в сосуд, в котором находятся 10 куб. сант. этого газа, внесено 10 куб. сант. водяного раствора, насыщенного углекислым газом. В этом последнем растворе содержится 18 куб. сант. углекислого газа. Этот газ начинает выделяться. Под конец этого выделения должно наступить равновесие. В жидкости будет заключаться углекислый газ, оставшийся под парциальным давлением того газа, который выделяется. Спрашивается, сколько газа будет оставаться в растворе и сколько перейдет в атмосферу. Для того, чтобы решить эту задачу, предположим, что мы ее уже решили, и предположим, что осталось в растворе X куб. сант. углекислого газа. Очевидно, что количество углекислого газа, перешедшего в атмосферу, будет 18—X; а объем всего газа будет 10 + 18 — X, то есть, 28 — X куб. [сант]. Парциальное давление, под которым растворяется углекислый газ, будет равно (предполагая, что во все время общее давление будет оставаться нормальным, то-есть 760 мм.). $\frac{18-X}{28-X}$; следовательно, углекислого газа растворится не 18 куб. сант. (так было бы, если бы парциальное давление было равно атмосферному), а только $18\frac{18-X}{28-X}$, что и равно X, следовательно имеем уравнение:

$$18\,\frac{18-X}{28-X} = X,$$

решая которое, получим $X = 8{,}69$.

Таким образом, если атмосфера, в которую введен газовый раствор, будет не только другая, но и безграничная, то растворенный газ, выделяясь, будет растворяться в этой безграничной атмосфере и будет, по своей ограниченности, оказывать в беспредельной атмосфере безконечно малое давление. Следовательно, под этим бесконечно малым давлением газ не может оставаться в растворе и будет выделяться вовсе из раствора. По этой причине, вода, насыщенная газом, не содержащимся в атмосферном воздухе, будучи выставлена на атмосферный воздух, совершенно лишается растворенного газа, но должно заметить, что, в этом случае, при испарении газа из раствора, испаряется и вода, и очевидно, что могут быть такие случаи, в которых между количеством испаряющейся воды и количеством газа, выделяющимся из раствора, будет постоянное отношение, так что будет испаряться не газ один, а весь газовый раствор. Выделение растворенного газа при бесконечном количестве другого газа, определяет многие явления, замечаемые в растворах. Так, например, одним растворяющимся газом можно вытеснить другой вполне из раствора. Так, например, если углекислый газ пропускать в воду, содержащую в своем растворе кислород, то он может вытеснить весь кислород из раствора. Это зависит от того, что над поверхностью раствора образуется только атмосфера углекислого газа и под влиянием этой атмосферы кислород не будет оставаться в растворе, а будет вполне выделяться из него. По той же самой причине, при кипячении газовой жидкости, содержащей газовый раствор, можно выкипятить весь содержащийся в растворе газ, по крайней мере во многих случаях. В самом деле, на поверхности кипящей жидкости будет водяной пар и, следовательно, все давление, оказываемое на газ, будет принадлежать водяному пару. Следовательно, парциальное давление растворенного газа будет весьма незначительно. По этой, а не по какой-нибудь другой причине, газ выделяется при кипячении жидкости из раствора. При темпе-

ратуре кипения воды, растворимость газов в воде еще достаточно велика, чтобы оставалось значительное количество газа в растворе; но выделяющийся водяной пар составляет атмосферу, посредством которой передается давление. Растворенный в жидкости газ уносится вместе с парами воды; если кипячение продолжается долгое время, наконец весь выделяется. Однако, в тех случаях, когда изменение коэффициента растворимости с температурою не достаточно велико и когда при температуре кипения раствор будет выделять известное количество водяного пара и газа, может получаться атмосфера, имеющая такой же состав, как и сама жидкость. Тогда, в такую атмосферу не будет переходить больше газа, чем находится в жидкости, и потому такой газовый раствор будет перегоняться без изменения, не будет изменять состав во все время кипения или перегонки. Раствор будет представлять тогда, как и раствор иодистого водорода в воде, жидкость, не изменяющуюся при перегонке, пока не изменится давление, под которым эта перегонка совершается. Чрез это изменение давления изменяется отношение между количеством водяного пара, находящегося в атмосфере, и количеством газа, выделяющимся вместе с парами воды, а именно, при пониженном давлении, температура кипения понизится, количества водяного пара и газа, выделяющегося из раствора, будут, по взаимному отношению, иные, а потому и состав неизменной от перегонки жидкости будет другой.

Многие явления в природе объясняются законами, управляющими растворимостью газов в жидкостях, как мы этому видим примеры в дальнейшем изложении. Считаем не лишним заметить, что поглощение водяного пара из воздуха гигроскопическими телами, самою водою и т. п. следует, в сущности, тем же самым законам, каким следует растворение или поглощение другого газа, находящегося в воздухе. Водяной пар, находящийся в воздухе, представляет не что иное, как газ, имеющий известное парциальное давление и, потому под этим давлением растворяющийся в различных других жидкостях. Только здесь присовокупляется еще одна особенность, зависящая от насыщения пространства парами, и потому-то, в совершенно влажной атмосфере, несмотря на малое парциальное давление водяного пара, не происходит дальнейшего испарения воды, потому что тогда давление водяного пара должно было бы превосходить то наибольшее давление, которое свойственно водяному пару при известной температуре.

Пятая глава

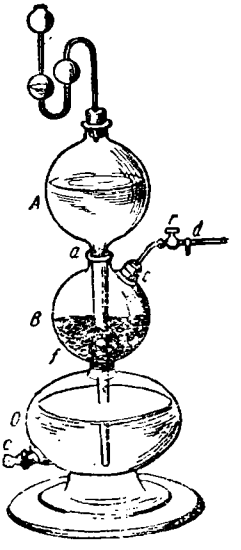
О разложении воды и водороде

Приемы для приготовления и собирания газов

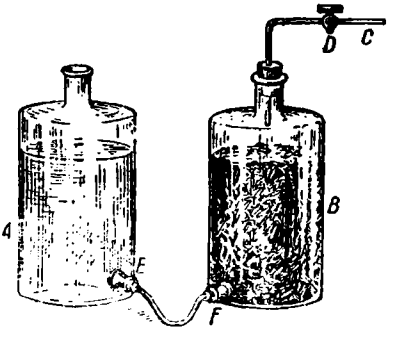
(стр. 206—216)

Практические приемы для приготовления и собирания газов. Когда в химической практике требуется иметь возможность по временам пропускать водородный газ (или другие газы, отделяющиеся без нагревания), то употребляют разные приборы. Первый прибор (фиг. 55) состоит из двух соединенных между собою шаров *O* и *B*. В верхний кладется цинк и вставляется плотно (в горле *a* воронка *A*, доходящая до дна нижнего шара. В эту воронку наливается кислота. Если кран *r* открыть, то кислота втекает в нижний шар и, доходя до верхнего шара, действует на цинк, отделяет водород, который можно провести чрез каучуковую трубку *d* куда требуется. Если кран *r* закрыт, то водород будет отделяться, давление его в шаре *B* увеличится и он вытеснит кислоту в шар *O* и воронку *A*. Тогда его выделение прекратится, а при открытии крана снова возобновится. Прибор этот, однако, вмещает мало цинка, ломок и потому мало пригоден для своего назначения. Другой прибор, изображенный на фиг. 56, состоит из двух склянок *A* и *B*. Обе имеют внизу отверстия *E* и *F*, в которые вставлены пробки с трубками, а на эти трубки надета соединяющая их каучуковая трубка (иногда с зажимным краном). В одну склянку кладется цинк, в другую наливается кислота. В верхнее горло первой из них вставляется пробка с газоотводной трубкой и краном. Если сообщить между собою названные сосуды, и выпускной кран открыть, то кислота притечет к цинку и будет отделять водород. Если выпускной кран закрыт, то водород вытеснит кислоту из сосуда *B* и действие прекратится. Можно также сосуд с кислотою *A* поставить

вниз — тогда из сосуда *B* вся жидкость стечет в сосуд *A*, а для того чтобы действие началось, можно сосуд *A* поднять выше *B* и кислота перельется в сосуд с цинком. Такой прибор представляет простейшую форму постоянно действующего снаряда, оказывающего большую пользу при химических работах. Этот же снаряд может служить для собирания газов (как аспиратор или газометр). Представьте, что сосуд *A* наполнен водою, [1] а *B* наполним газом или воздухом. Отворив кран *D* и поднимая *A*, можно выгнать из *B* весь воздух или газ. Когда *B* наполнится водою, тогда газоотводную трубку *C* можно сообщить с прибором, отделяющим газ, и сосуд *A* опустить ниже *B*. От этого вода из *B* будет вытекать и вместо нее будет входить в этот сосуд отделяющийся газ. *B* этом последнем случае наш прибор исполняет роль а с п и р а т о р а, то есть вытягивает газ. Тогда газ в *B* будет иметь меньшее давление, чем наружный воздух. Разность давлений будет равна разности высот воды в обоих сосудах. Если желают собранный газ перевести в другой сосуд, то, заперев краны, сосуд *A* поднимают выше *B*. Тогда при отворенных кранах давление газа будет более атмосферного, а потому он будет выходить чрез газопроводную трубку. *B* этом случае наш прибор исполняет роль г а з о м е т р а. Его можно



Фиг. 55. Прибор Киппа для получения водорода и других газов, отделяющихся при обыкновенной температуре, например, сероводорода и углекислого газа (1/6).



Фиг. 56. Наиболее удобный прибор, назначенный для той же цели, как и прибор, изображенный на фиг. 55, а также могущий заменять аспиратор и газометр. Размеры разнообразные.

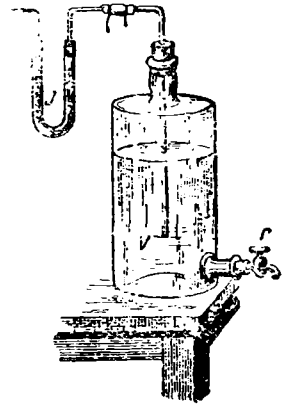
сделать из всяких двух склянок, не имеющих внизу боковых отверстий, если чрез горло пропустить стеклянные трубки, идущие до дна и сообщающиеся между собою каучуковою трубкою. Переливание воды здесь будет происходить, если раз каучуковую трубку наполнить водою и если наблюдать, чтобы газ чрез нее не проходил. Тогда две трубки и каучуковая трубка, их соединяющая, будут действовать, как сифон. Такой прибор может сделать каждый, и он заменяет многие другие.

В лабораториях однако употребляются обыкновенно и многие другие приборы для вытягивания, собирания и сохранения газов. Мы упомянем здесь об обыкновеннейших. Как *аспиратор* чаще всего употребляется сосуд, изображенный на фиг. 57. Это склянка *V* с выпускным краном *r*, помещенным внизу. В горло склянки вставляется плотная пробка со стеклянною трубкою. Если склянку наполнить водою до пробки и отворить кран *r*, то вода будет вытекать, а газ входить в аспира-

[1] Если для наполнения взять ртуть, то таким прибором легко действовать, как насосом.

тор. Стеклянная трубка для этого сообщается с тем прибором, из которого нужно высосать или вытянуть газ. Для того, чтобы при этом из аспиратора влажность не попала в прибор с газом, помещается между ними трубка *J* с кусками хлористого кальция. Емкость аспиратора можно разделить на части или просто узнать объем вытекшей воды и по этому судить об объеме газа, прошедшего в прибор.

Можно рекомендовать как простейший, долго действующий и легко составляемый аспиратор, изображенный на фиг. 58. Это есть трубка *ab*, вверху широкая, а внизу узкая и длинная. Отверстие последней не должно быть более толщины пера. В горло *a* вставляется плотная пробка с двумя отверстиями. Чрез одно вставляется трубка *fg*, втягивающая газ, чрез другое вставлена воронка *c*. В нее наливают воду (из большого сосуда или водопроводного крана *d*). Нижнее отверстие воронки с должно быть меньше нижнего отверстия трубки *b*. От этого из воронки будет вливаться меньше воды, чем может вытекать из трубки *b*, а потому в трубке *bh* будут столбики воды перемежаться со столбиками газа и газ будет уноситься вместе с водою. Загибая конец *b*, погружая его в сосуд с водою и ставя над ним колокол, можно собрать газ, выделяющийся чрез *gfb*. Заменяя воду ртутью и делая *hb* более 760 мм., можно таким аспиратором действовать как воздушным насосом и из ограниченного пространства вытянуть весь воздух, сообщая, например, *g* с шаром. Это есть очень простая и удобная форма насоса (фиг. 72). Необходимо при действии этого аппарата наблюдать, чтобы в воронке *c* всегда был слой жидкости, иначе чрез отверстие воронки будет входить в прибор воздух.

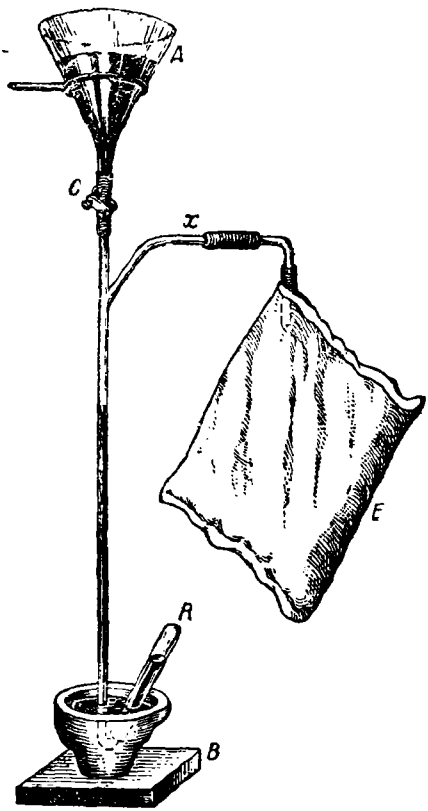


Фиг. 57. Обыкновенный аспиратор. Различные размеры.

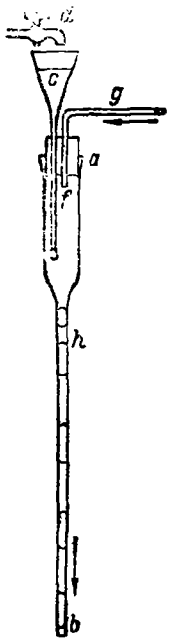
Для собирания и сохранения газов часто употребляют **газометры**. Их делают из стекла, меди и жести. Обыкновенная форма медного газометра изображена на фиг 59 и в большем размере на фиг. 40. Нижний сосуд *A* делается совершенно герметическим, то есть не пропускающим газов, и наполняется водою. На этом сосуде (на нескольких ножках) прикреплена воронка *C*. Сосуд *A* сообщается с дном воронки *C*, краном *a* и трубкою *b*, идущею до дна сосуда *A*. Когда в *C* налить воды и открыть краны *a* и *b*, то вода будет втекать чрез *b*, а воздух выходить чрез *a*. Сбоку сосуда *A* приделана стеклянная трубка, сообщающаяся с ним вверху и внизу и позволяющая видеть, сколько воды и газа находится в газометре. Если газометр наполнен водою, то для наполнения его газом закрывают краны *a*, *b* и *c*, открывают пробку (с винтом) *d* и чрез нее вводят в газометр конец газоотводной трубки, из которой выделяется газ. По мере того, как газ будет входить в газометр, вода из *d* будет вытекать. Если газ не имеет давления более атмосферного, а его требуется собрать в газометр, то кран *c* сообщают трубкою с пространством, содержащим газ. Тогда, отворив отверстие *d*, будут иметь аспиратор, газ будет входить чрез *c*, а вода вытекать чрез *d*. Закрыв краны, легко сохранять и переносить газ, собранный в прибор. Если требуется этот газ провести куда либо, то на кран *c* надевают газопроводную трубку, кран *b* открывают (*a* и *d* должны быть закрыты) и тогда газ чрез *c* будет проходить от того, что давление его в приборе будет более атмосферного, под влиянием давления воды, налитой в воронку. Если требуется наполнить газом цилиндр или склянку, то ее наполняют водою, опрокидывают в воронке *C* и открывают краны *b* и *a*. Тогда чрез *b* будет входить вода, а чрез *a* газ будет выходить из газометра.

Герметическое составление приборов. Приготовление, перевод и сохранение газов требует, чтобы содержащие газ сосуды не имели никакого прямого сообщения с воздухом, иначе он входит в прибор и газ переходит в воздух. Поэтому все пробки, все соединения и прочее должны не иметь ни малейших отверстий. Для этого пробки, употребляемые в аппаратах, должны быть выбираемы с большою тщательностью, не должны иметь ноздреватости. Пробку сперва должно размять, для чего лучше всего положить под доску и катать. Отверстия пробок должно просверливать сколько возможно правильные и такого диаметра, какой имеют вставляемые газопровод-

ные стеклянные трубки. Чтобы проделать такие отверстия в пробке, лучше всего употреблять пробочные буравы разных диаметров. Это суть латунные тонкостенные трубки. Нижний конец такой трубки обточен и подпилен так, что представляет острый режущий край, а верхний конец имеет рукоятку. Надавливая таким буравом на пробку и поворачивая бурав, легко сделать в пробке цилиндрическое отверстие, имеющее диаметр бурава. Можно также прожигать и пропиливать круглым напилком желаемые отверстия. Стеклянная трубка, вставляемая в отверстие, обмазывается салом и должна входить в пробку туго так же, как и пробка в горло



Фиг. 72. Прибор Грема для разложения воздуха с помощью просачивания его чрез каучук (1/18).

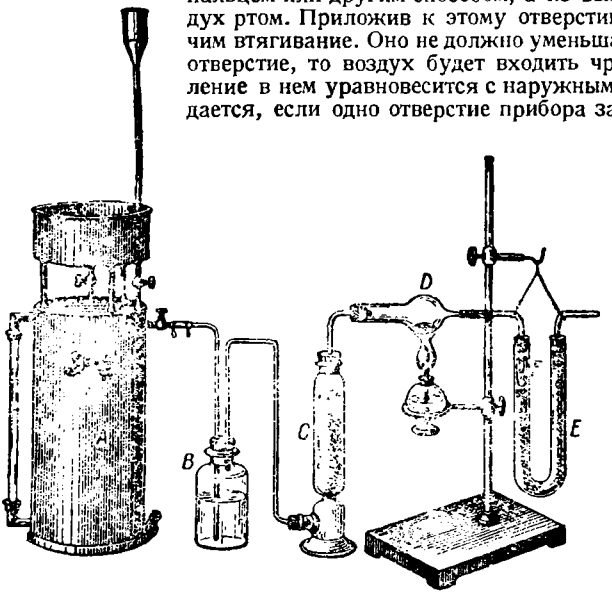


Фиг. 58. Аспиратор, действующий постоянно. Трубка *bh* должна быть длинная (1/5).

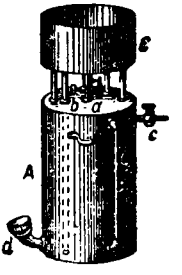
сосуда. И трубки, и горла сосудов должны быть цилиндричны, в разрезе представлять круг, а не эллипс, иначе нельзя получить плотного соединения. Иногда пробку вываривают в растопленном воске. Если пробка не держит и имеет отверстия, то ее примазывают к горлу сосуда замазкой или тестом, или смесью хлористого цинка, крахмала и окиси цинка или заливают клеем, смешанным с глицерином, или лаком и т. д. Но лучше всего употреблять каучуковые пробки, как наиболее упругие и однородные. Для соединения стеклянных трубок, для проведения газов и жидкостей, в химической практике употребляются очень часто каучуковые или резинковые (неверно называют иногда их гуттаперчевыми) трубки. Их упругость позволяет надевать их плотно на твердые трубки и перетягивать нитками для плотнейшего соединения; их гибкость дает подвижность частям прибора, ими соединенным, и их неизменяемость позволяет употреблять их долгое время и даже для кислот и щелочей (только не для маслянистых жидкостей). Однако каучук в тонком слое

отчасти проницается газами, а потому, если требуется полная непроницаемость, каучук должно покрывать сверху смесью клея с глицерином или лаком.

Необходимо всегда испытать прибор, назначенный для приготовления газа, относительно того, что все его соединения совершенно плотны, держат герметически, не имеют сообщения с воздухом. Для этого входное отверстие прибора запирают пальцем или другим способом, а из выходного вытягивают воздух ртом. Приложив к этому отверстию губу или палец, получим втягивание. Оно не должно уменьшаться. Если есть где либо отверстие, то воздух будет входить чрез него в прибор и давление в нем уравновесится с наружным. Еще точнее это наблюдается, если одно отверстие прибора закрыть, например, пробкою, а к другому присоединить вертикальную трубку, которую погрузить в воду. Если теперь нагреть (хотя бы просто руками) сосуд, имеющийся в приборе, то чрез воду выйдет несколько пузырь-



Фиг. 40. Определение количества воды чрез высушивание в струе сухого воздуха и поглощение выделившейся воды в трубке *E*. В 1/20 натуральной величины.

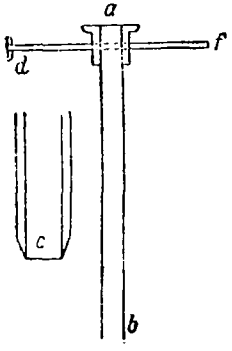


Фиг. 59. Газометр (1/20).

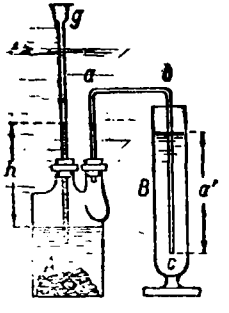
ков воздуха и по охлаждении сосуда (можно его прямо охладить, погрузив, например, в холодную воду) давление воздуха в приборе будет менее атмосферного. От этого вода, запирающая прибор, поднимется в трубочке на некоторую высоту. Если все части заперты герметически и температура прибора не меняется, то уровень поднявшейся воды будет постоянен, а если есть отверстие, то он будет падать, потому что наружный воздух будет входить внутрь прибора.

Газовое давление в приборах. Когда газ отделяется из данного прибора, то, накопляясь в нем, он может иметь упругость бо́льшую, чем атмосферный воздух. Это необходимо иметь постоянно в виду, составляя газовые приборы и приготовляя газы. От этой причины уровень в открытой трубке, погруженной в жидкость, отделяющую газ (особенно тогда, когда отделяющийся газ проникает слой другой жидкости), будет не одинаков с уровнем той жидкости, в которую трубка погружена. Если в сосуде (фиг. 61) *A* приготовляется газ, например водород, и если газопроводная трубка *ab* погружена в цилиндр *B* с жидкостью, имеющей плотность *d*, то выходящий газ непременно должен иметь внутри прибора давление, превышающее атмосферное — иначе не было бы выделения газа. Перевес давления будет равен высоте *a'* столба жидкости, чрез который должен газ проникать. Итак в приборе *A* давление водорода будет более атмосферного на $\frac{d \cdot a'}{13{,}6}$ мм, если мы выразим *a'* в миллиметрах, а перевес давления—в столбе ртути, имеющей то же давление. Воронка *g* погружена в жидкость, подверженную этому усиленному давлению другой ее конец сообщен с атмосферой, а потому в ней жидкость поднимется

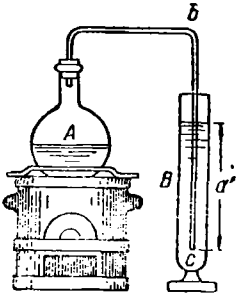
на высоту h. Эту высоту мы найдем, если узнаем плотность d' жидкости, находящейся в воронке (например, серной кислоты или раствора цинкового купороса). По отношению к ртути она будет соответствовать давлению столба вышиною $\frac{d'h}{13{,}6}$. Но эта высота должна быть равна высоте $\frac{d \cdot a'}{13{,}6}$, потому что поднятие зависит от одного перевеса давления. Следовательно $\frac{d'h}{13{,}6} = \frac{da'}{13{,}6}$, откуда $h = a' \cdot \frac{d}{d'}$. Представим себе, что от охлаждения или поглощения газа, или от какой либо другой причины, давление газа в приборе уменьшилось и сделалось даже менее атмосферного. Что произойдет тогда? Тогда конечно отделение прекратилось бы и в трубке bc жидкость поднялась бы выше уровня сосуда B, а в воронке g опустилась бы ниже уровня сосуда A. Если бы уменьшение давления продолжалось, то случилось бы одно из двух: или бы жидкость из сосуда B перешла бы в сосуд A или бы чрез g стал бы внутрь прибора входить воздух. Вхождение воздуха конечно менее может вредить прибору и производству большинства опытов, чем перебрасывание жидкости из B в A, а потому стараются, чтобы такое перебрасывание жидкости не случилось. Для этого стоит только уменьшить погружение воронки g в жидкость. Тогда скорее взойдет в A воздух, чем из B жидкость. По этой то причине воронка или трубка, погруженная в жидкость на малую глубину и открытая сверху, предохраняет газовые приборы от перебрасывания жидкостей из одной части прибора в другую, при разных случайностях приготовления газов. Такая воронка или трубка носит, по этой причине, название *предохранительной трубки*.



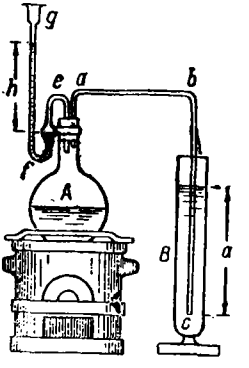
Фиг. 60. Пробочный бурав состоит из полой латунной трубки ab, нижняя часть которой представлена слева в естественную величину (c). Верхний конец бурава имеет поперечное отверстие, в которое вставляется стальная проволока df, служащая рукояткой. Этим прибором вырезываются в пробках круглые отверстия для вставки стеклянных газопроводных трубок.



Фиг. 61. Положение уровней жидкостей в приборе, служащем для добывания водорода и т. п. газа.



Фиг. 62. Выделение газа без предохранительной трубки. Жидкость из B может перебросится в A



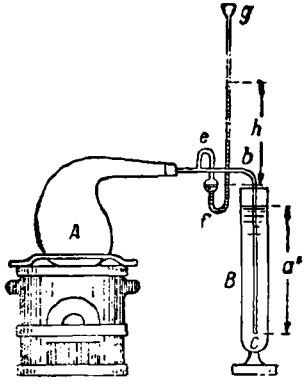
Фиг. 63. Добывание газа с предохранительною трубкою, дающей возможность приливать жидкость в воронку g, не открывая пробки, и недопускающею перебрасывание жидкости из B в A.

Необходимость предохранительных трубок в особенности ощутительна при составлении приборов для получения газов, в воде растворимых или растворяющихся в том

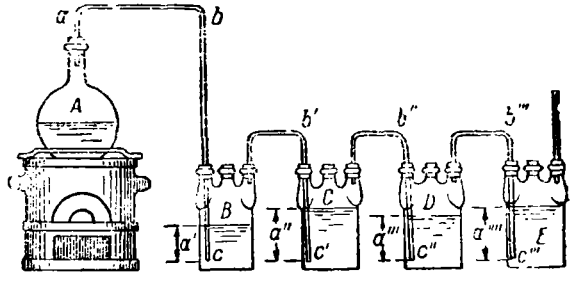
веществе, в раствор которого пропускаются газы. Представим себе (фиг. 62), что в колбе *A* добывается газ, растворяющийся в жидкости, помещенной в цилиндре *B*. Газ будет находиться в колбе под давлением атмосферным, увеличенным давлением столба жидкости *a'*. Помножая высоту этого столба на плотность жидкости, помещенной в сосуде *B*, и разделяя на плотность ртути, получим выражение высоты этого столба, если бы жидкость была ртутью. Представим теперь, что отделение газа в колбе *A* прекратилось и что жидкость, помещенная в *B*, поглощает оставшийся газ; от этого жидкость будет входить из цилиндра *B* в колбу *A*. Чтобы этого избежать, прибор располагают так, как изображает фиг. 63. В горло колбы вместе с газоотводной трубкой *ac* укрепляется так называемая предохранительная или вельтеровская воронка *gfe*. В эту воронку наливается или та жидкость, которую должно приливать в колбу *A* для реакции, или, если такое прилитие не требуется, то в нее наливается ртуть. Эта воронка, во первых, дает возможность приливать жидкость во время самого хода отделения газа, а во вторых, она предохраняет от перебрасывания жидкости из цилиндра *B* в колбу *A*. Это предохранение от случайного перебрасывания жидкости производится вельтеровской трубкой на том основании, что в ней есть шарик *u*, расположенный так, как представляет фигура. Пока отделение газа совершается правильно чрез отверстия *c*, упругость внутреннего газа равна упругости атмосферной, увеличенной высотою столба *a'*, как и в предыдущем примере. В это время в предохранительной трубке жидкость будет подыматься до высоты *h*, то-есть будет стоять в разных ее ветвях не одинаково и в наружной ветви будет стоять выше, чем в шарике *u*. Высота *h* будет соответствовать перевесу давления газа, помещенного в приборе, над атмосферным, и если плотность жидкости, помещенной в вельтеровской трубке, будет одинакова с тою, которая находится в цилиндре *B*, то высота *h* будет равна высоте *a*; если же плотность первой жидкости будет больше, чем последней, то *h* будет меньше *a* на столько, на сколько плотность жидкости в вельтеровской трубке будет больше плотности жидкости в цилиндре *B*. Если теперь выделение газа прекратится, то одновременно с тем, как жидкость из цилиндра *D* будет подыматься по газоотводной трубке *ca*, в то же самое время в вельтеровской трубке жидкость будет опускаться. Когда уровень жидкости в газоотводной трубке *ac* достигнет до уровня жидкости в цилиндре *B*, тогда в вельтеровской трубке уровни жидкости в шарике и в открытой ветви будут одинаковы. В этот момент давление газа в приборе будет равно атмосферному. Если еще будет далее продолжаться поглощение газа или его сжатие, например, чрез охлаждение, то тогда жидкость из цилиндра *B* будет подыматься в газоотводной трубке *ac*, что будет зависеть от перевеса атмосферного давления над внутренним давлением газа в колбе. В это время в открытой ветви вельтеровской трубки жидкость будет опускаться, а в шарике она будет подниматься. Так как шарик имеет гораздо больший диаметр, чем трубка, то высота жидкости в шарике будет увеличиваться очень незначительно, и лишь только перевес атмосферного давления над внутренним достигнет такой величины, которая будет соответствовать давлению столба *uf*, тогда чрез воронку *gf* будет попадать в прибор воздух, и, следовательно, жидкость из сосуда *B* не может перебросться в колбу *A*. Таким образом, при всех случайностях приготовлений, предохранительная трубка дает возможность избежать перебрасывания и позволяет в то же время приливать постепенно действующую жидкость в колбу, не открывая пробки. Для этого стоит только в воронку *g* вливать необходимую для реакции жидкость. Давление приливаемой жидкости заставит ее подниматься от *n* к *e*. Когда это поднятие достигнет до вершины изогнутой трубки *e*, тогда произойдет переливание в колбу *A*. Для этой-то цели и необходимо, чтобы ветвь *fg* была возможно высока. Столб жидкости, в ней помещающийся, должен уравновешивать не только высоту *fe*, но и давление того столба жидкости, чрез которую добываемый газ должен проникать. Устройство предохранительной трубки в тех случаях, когда сосуд, употребляемый для отделения газа (или пара), сообщен с одною газоотводной трубкой, изображено на рисунке 64. В этом случае в вельтеровскую трубку наливают ртути, потому что она по своей большой плотности представляет малую высоту поднятия, уравновешивающую большой столб жидкости, чрез которую должен проходить газ.

В тех случаях, когда газ должен проходить чрез несколько сосудов, является еще более опасности от перебрасывания. Такой случай представляется, например, тогда, когда требуется выделяющийся газ очистить пропусканием чрез подходящие

жидкости, например, чрез раствор едкого кали или чрез серную кислоту, для отделения влажности и т. п. Если прибор для этого составить так, как изображает фиг. 65, и пропустить газ чрез 4 вульфовых склянки *B*, *C*, *D* и *E*, то газ, находящийся в колбе *A*, будет иметь давление, превышающее атмосферное на сумму высот a^{I}, a^{II}, a^{III}, a^{IV}, по причинам, весьма понятным из предыдущего рассуждения. Если жидкости различных вульфовых склянок имеют неодинаковую плотность, то, зная плотность каждой жидкости, помножая ее на соответственную высоту и

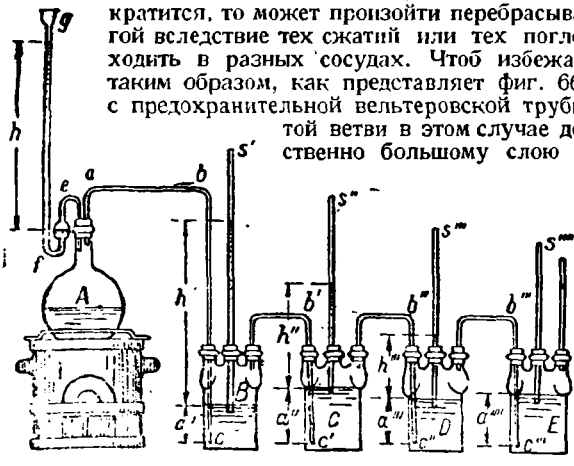


Фиг. 64. Перегонка или добывание газа в реторте с предохранительною трубкою.



Фиг. 65. Прибор с вульфовыми склянками *B*,*C*,*D* и *E* для добывания и очищения (или насыщения) газа, без предохранительных трубок.

разделяя на плотность ртути, можно узнать тот перевес давления, который производится прохождением газа чрез каждую склянку. Очевидно, что в сосуде *E* газ находится под атмосферным давлением, в сосуде *D* под давлением атмосферным и столба жидкости a^{IV} и т. д. Если в таком снаряде отделение газа прекратится, то может произойти перебрасывание из каждого сосуда в другой вследствие тех сжатий или тех поглощений, которые могут происходить в разных сосудах. Чтоб избежать этого, прибор составляют таким образом, как представляет фиг. 66. Не только колбу сообщают с предохранительной вельтеровской трубкой, у которой высота открытой ветви в этом случае должна быть большая, соответственно большому слою жидкости, чрез которую газ должен проникать, но и каждую вульфовую склянку снабжают предохранительной трубкой, помещая в третье или среднее горло каждой склянки стеклянную трубку *s*, открытую с обоих концов. Нижний конец трубки погружается едва в жидкость; верхний же подымается до высоты, соответствующей тому давлению, которое имеет газ в данной вульфовой склянке. Поэтому трубку *a* склянке *B* берут длиннее, чем в склянках *C* и *D*. В склянке *E* можно не ставить предохранительной трубки, если газ из нее прямо выходит на воздух. Если же газ далее идет еще в жидкость, то и в *E* должно поставить предохранительную трубку. Во время отделения газа, если бы мы представили, что жидкости



Фиг. 66. Такой же прибор как и 65, но с предохранительными трубками *g*, *s'*, *s''*, *s'''* и *s''''*.

во всех скляниках имеют одинаковую плотность, высоты h, h', h'', h''', будут уменьшаться, а именно высота h''' будет равна высоте a^{IV}, если плотности жидкостей в сосудах D и E одинаковы. Если они будут не одинаковы, то высоты будут зависеть от плотностей, как сказано выше. Высота h'' будет равна сумме высот a^{III} и a^{IV}; h' будет равна $a^{II} + a^{III} + a^{IV}$; и наконец h будет равно сумме всех a. Если отделение газа прекратится и произойдет сжатие, например, в колбе A, то тогда произойдет в ней уменьшение давления; жидкость в трубке g будет падать и газ из прибора отделяться перестанет. Когда это уменьшение дойдет до того, что газ в колбе будет иметь меньшую упругость, чем атмосферный воздух, тогда в трубке bc будет подниматься жидкость, а в трубке s' она будет опускаться, так же, как и в вельтеровской трубке; следовательно трубка s' для вульфовой склянки B будет служить таким же предохранительным снарядом, как вельтеровская трубка для колбы. При уменьшении давления в каждой из вульфовых склянок перед расыванием не произойдет по той причине, что прежде, чем оно может произойти, чрез предохранительную трубку взойдет внутрь прибора воздух.

При всех описываемых далее способах приготовления газов необходимо прибавлять к прибору предохранительные трубки, и мы упоминаем здесь об этом потому, что несоблюдение этого условия может, при добывании некоторых газов, повести не только к неудаче опыта, но иногда даже к несчастным случаям, если например, перебросится вода в нагретую серную кислоту. В этом случае, как и во многих других, может произойти от этой причины вдруг огромное развитие тепла, паров и газов, взрыв и потеря назначаемого для получения газа. Поэтому-то всем, кто хочет заниматься приготовлением газов, должно всегда советывать не забывать о предохранительных трубках. Их можно не брать только в тех случаях, когда отделение газа совершенно правильно и когда в приборе нет никаких поглощающих жидкостей; но и в этом случае нужно иметь в виду, что при охлаждении может быть перебрасывание жидкости, а потому для безопасности, в особенности при долговременной работе с газом, и здесь полезно употреблять предохранительные трубки.

Свойства водорода

(стр. 217—220)

Эта малая плотность водорода определяет многие замечательные свойства этого газа; так, например, вследствие этой плотности водород чрезвычайно скоро вытекает из тонких отверстий. Если склянку, имеющую трещины, наполнить водородом и опустить открытым концом в воду или ртуть, то эти последние будут подниматься в сосуд, вследствие того, что водород будет чрез трещины выходить почти в 3,8 раз быстрее, чем воздух будет входить чрез эти трещины внутрь сосуда. Из поднятия жидкости можно ясно видеть эту особенность водорода. Точно то же самое еще легче наблюдать с точностью, если вместо склянки употребить трубку, конец которой заперт пористым веществом, таким, например, как графит, немуравленая глина или гипсовая пластинка.

Какие ни делали до сих пор усилия для превращения водородного газа в жидкость, все они были напрасны: водород остается газом даже под давлением, бо́льшим, чем 1000 атмосфер.[1]

Будучи газом не сжимаемым, водород имеет малую способность растворяться в различных веществах; до сих пор не известно ни одной жидкости, которая бы хорошо растворяла водород. Вода и спирт

[1] На сколько мне известно, до сих пор не было сделано опытов произвести усиленное давление над водородом при самых низких температурах, каких можно достичь.

растворяют только очень малое количество этого газа, а именно при 0° один объем воды 0,019300 [объема] водорода, а спирт 0,0692.

По некоторым своим физическим свойствам водород представляет отличие от всех других известных газов и, что чрезвычайно характерно, как бы приближается в этом отношении к металлам; так что можно выразиться об водороде, что это есть газообразный металл. В самом деле, исследования Магнуса показали, что водород представляет весьма большую теплопроводность, сравнительно со всеми другими газами. Впрочем, большое отличие свойств водорода от свойств других газов зависит весьма много от того, что плотность его несравненно менее, чем большинства других газов.

Для характеристики физических свойств водорода весьма полезно заметить, что коэффициент расширения этого газа не изменяется под разными давлениями. По опытам Реньо коэффициент расширения водорода при нормальном давлении в 760 мм. и при давлении в 2542 мм. ртутного столба остался один и тот же, а именно 0,003661; тогда как большинство других газов представляют в этом отношении значительное различие; например воздух при давлении в 760 мм. имеет коэффициент расширения между 0° и 100° 0,003670, а под давлением 2620 мм. 0,003696. Углекислый газ представляет при 760 мм. коэффициент расширения 0,003710, а при 2520 мм. 0,003845.

Что касается до изменения объема водорода с давлением, то в этом отношении водород также представляет нечто характерное, а именно его объем меньше того, который следует принять водороду, если бы он вполне следовал закону Мариотта; он, так сказать, представляет в себе необыкновенную упругость, изменяющуюся подобно упругости металлической пружины, представляющей сопротивление тем большее, чем большему давлению она подвержена. Тогда как воздух и все другие изученные до сих пор газы сжимаются под влиянием усиленных давлений больше, чем следует по закону Мариотта, водород занимает при этом меньший объем, чем тот, который вычисляется по этому закону; так, например, когда давление над водородом увеличилось в 5,041 раза, его объем уменьшился только в 4,975 раза, когда первоначальное давление было около 4000 мм., а окончательное около 20 000 мм. [1]

Теплоемкость водородного газа под постоянным давлением атмосферы, по опытам Реньо, равна 3,409, если этим числом выражается количество тепла, нужное для нагревания одной весовой части водорода, когда такая же часть воды требует для нагревания одну единицу тепла. Очевидно, принимая вышеприведенную плотность водорода и теплоемкость воздуха равною 0,2375, что теплоемкость такого же объема водорода, как и воздуха, для водорода равна 0,2359, то-есть почти та же, что и для воздуха. Теплоемкость водорода весьма мало притом изменяется с температурою. Теплоемкость водорода при постоянном объеме равняется 3,16.

---

[1] Это замечательное отступление от всех других газов, однако, требует еще дальнейшего подтверждения, потому что водород, в отличие от других газов, по-видимому, не сгущается на поверхности стекла, как показали мои наблюдения, и таким образом, не дает погрешности, свойственной другим газам, сгущающимся на стекле. Это сгущение для других газов производит отклонение от закона Мариотта, при наблюдениях в измерении объема. Оно, по всей вероятности, увеличивается при увеличивании сжатия газов и потому объем газа будет, при усиленном давлении, от сгущения уменьшаться. Именно я сделал следующее наблюдение. Хорошо очищенный стеклянный сосуд, будучи нагрет и охлажден под колоколом воздушного насоса, отлично смачивается водою. Если же останется в воздухе или другом газе, то плохо смачивается водою, особенно содержащею в растворе соли. Это зависит от того, что газы сгущаются по поверхности стекла, однако не быстро. Если охлаждение произвести в водороде, то смачивание будет полное, как при охлаждении в пустоте. Конечно, эти наблюдения не достаточно полны, чтобы совершенно решить вопрос, но все же возбуждают сомнение относительно неточности закона Мариотта.

Часть вторая (т. II), третья глава

О теплоемкости

О теплоемкости газов

(стр. 107—110)

Величина, выражающая теплоемкость, во всяком случае состоит из суммы нескольких независимых или отчасти только зависимых величин. При нагревании вещества, оно изменяет свой объем, движение его частиц, то есть теплотное состояние их (температура) изменяется, изменяется также, конечно, и движение атомов, находящихся в частицах (иначе теплота не изменяла бы столь явственно химические свойства, прочность и т. п.), наконец с переменою температуры может происходить перемена состояния: твердое тело размягчается и плавится, жидкость испаряется, вещество переходит в изомерное состояние и т. д. Все такие изменения, в отдельности взятые, происходят на счет поглощения или сопровождаются выделением тепла, а потому в величине, выражающей теплоемкость, принимают некоторое участие. Поэтому для одного и того же элемента определится различная атомная теплоемкость, смотря по тому, в свободном или соединенном состоянии взят он, жидкий, твердый или газообразный и т. п. Так теплоемкость воды при 0° = 1, при 100° = 1,013, при 180° = 1,036, в состоянии льда = 0,502, в парах = 0,475. При переходе в парообразное состояние всегда теплоемкость уменьшается, то-есть для нагревания одного и того же веса воды и ее паров от t° до (t°+1) [1], требуется не одинаковое количество тепла, а именно для воды почти вдвое больше тепла, чем для паров; повидимому же при нагревании воды должно бы поглощаться меньшее количество тепла, чем для паров, потому что вода в жидком состоянии менее расширяется, чем в парообразном, а потому частицы ее удаляются менее, чем частицы паров, последние, расширяясь, производят бо́льшую работу, чем вода. Но так как в действительности существует обратное, то и очевидно, что кроме того тепла, которое поглощается для возвышения температуры (то есть для увеличения быстроты движения частиц, объясняя явления тепла в смысле динамической гипотезы) и того тепла, которое превращается в механическую работу расширения, кроме них часть тепла идет для внутренних, молекулярных или атомных изменений. В этом смысле явление становится отчасти понятным. В частицах воды существует сцепление, которое при изменении движения должно преодолеть, а в газах и парах такого сцепления нет или, говоря точнее, оно очень мало и им можно даже пренебречь, если мы имеем дело с совершенным газом, как то доказывается многими физическими и механическими свойствами газов. Количество тепла, расходуемое для внутренней работы, совершающейся при нагревании твердых и жидких тел, весьма различно, смотря по температуре, природе тел и т. п. Для воды оно, очевидно, очень значительно, если ее теплоемкость в два раза более теплоемкости водяного пара. Это согласно с тем, что вода обладает значительным сцеплением (I—III) и потому для других тел теплоемкость жидкости и пара обыкновенно не столь различны между собою, как для воды. Например, для спирта 0,615, для его паров 0,457. По этим причинам количество тепла Q, потребное для нагревания одной весовой части тела на один градус, можно выражать суммою: Q = K + B + D, где K означает тепло, расходуемое действительно для нагревания, или то, что называют абсолютною теплоемкостью; B есть количество тепла, расходуемое на внутреннюю работу, совершающуюся при изменении температуры, и D — количество тепла, расходуемое для внешней работы. Для газов последняя величина легко может быть определена, зная коэффициент их расширения, который приблизительно = 0,00367. Прилагая к этому случаю те же суждения, какие приведены в I-ой части стр. 118 и след. [2], найдем, что один куб. метр газа, нагретый на 1°, произведет

[1] [В подлиннике опечатка: *t*°. *Прим. ред.*]

[2] [На стр. 118 Менделеев выражает давление водяного пара в *г/см*² и получает, что давление при 100° равно 1033 88 *г*. На стр. 119 сказано «В цилиндре, имеющем сечение 1 *см*² и в котором вода занимала высоту 1 *см*, по превращении в пар, поршень поднимается на высоту 1652 *см*. Этот поршень весит, как мы говорили, 1033 *г*; следовательно, внешняя работа пара, то-есть, та, которую произ-

внешнюю работу $10333 \cdot 0{,}00367$ или 37,92 килограммометров, на что потратится $\frac{37{,}92}{424}$, или 0,08944 единиц тепла. Таков расход тепла для внешней работы, производимой одним куб. метром газа, теплоемкость же относится к весовым единицам, а потому, чтобы узнать D, необходимо перевести найденную величину к единице веса. Один куб. метр водорода весит при 0° и 760 мм. давления 0,0896 кило, газ, вес частицы которого = p, а плотность p/2, [1] весит (при 0° и 760 мм.) 0,0448 p. кило, а потому один килограмм газа занимает объем $\frac{1}{0{,}0448\ p.}$ куб. метров, а следовательно при нагревании 1-го кило данного газа на 1° внешняя работа $D = \frac{0{,}08944}{0{,}0448\ p.}$, или $D = \frac{1{,}999}{p.}$; или почти $D = 2/p$. Величина внутренней работы B для газов ничтожна, а потому, взявши постоянные газы, мы можем ею пренебречь, положив B = 0; тогда для газов теплоемкость при постоянном давлении $Q = K + D$ или $Q = K + 2/p$, где K есть истинная теплоемкость, а p — вес частицы. Отсюда для них [2] $K = Q - 2/p$. Величину теплоемкости Q дают прямые опыты. По опытам Реньо для кислорода она = 0,2175, для водорода 3,405, для азота 0,2438 [3], для этих газов частичные веса 32, 2 и 28, а потому для них:

истинная теплоемкость (K) кислорода $= 0{,}2175 - 0{,}0625 = 0{,}1550$
» » » водорода $= 3{,}4050 - 1{,}0000 = 2{,}4050$
» » » азота $= 0{,}2438 - 0{,}0714 = 0{,}1724$

Вычисляя по формуле $K = Q - 2/p$.

Эти истинные теплоемкости простых тел находятся в обратном отношении к атомным их весам, то-есть их произведение на вес атома есть величина постоянная. Действительно, для кислорода это произведение $= 0{,}155 \cdot 16 = 2{,}48$, для водорода 2,40, для азота $0{,}1724 \cdot 14 = 2{,}414$, а потому, означив чрез P вес атома, имеем выражение $K \cdot P = 2{,}4$ (постоянной, которую можно считать за 2,45—2,4), что и составляет истинное выражение закона Дюлонга и Пти, потому что K есть истинная теплоемкость, а P вес атома. Должно впрочем заметить, что и произведение наблюдаемой теплоемкости Q на P есть также величина постоянная (для кислорода = 3,48, для водорода 3,40), что зависит от того, что внешняя работа D также обратно пропорциональна величине атомного веса. В самом деле $p = 2P$, $K = \frac{2{,}4}{P}$, а потому $Q = K + \frac{2}{p} = \frac{2{,}4}{P} + \frac{2}{2 \cdot P} = \frac{2{,}4 + 1}{P}$, откуда $Q \cdot P = 3{,}4$. Но очевидно, что это справедливо только для тех случаев, когда B = 0. Оттого-то и для газообразного хлора (Q = 0,1210), произведение $Q \cdot P = 4{,}296$, хотя он простой газ. Это от того, что в хлоре нельзя уже пренебречь внутреннею работою. Действительно, она в нем значительна, оттого $Q \cdot P$ и более 3,4. Ее можно вычислить, если бы точно знать для хлора плотность и коэффициент расширения. Полагая приближенно последний = = 0,00367 и плотность = P, считая при том, что для хлора $K = \frac{2{,}4}{P}$, как для других газов, получим: $Q = 0{,}1210 = \frac{2{,}4}{P} + B + \frac{2}{2P}$, откуда (P = 35,5), получим, $B = 0{,}121 - 0{,}068 - 0{,}028 = 0{,}625$. [1] Для газов и паров сложных тел закон $K \cdot P = 2{,}4$ оправдывается, если взяты будут совершенные (перегретые) газы, и если $p \cdot \frac{p}{n}$ означает вес одного атома сложного тела, то есть для них $p \cdot K = n \cdot 2{,}4$,

---

вдет вода, превратившись в пар, при 100° будет состоять в поднятии поршня, имеющего вес 1033 *г*, на 1652 *см* или работу 17,06516 *кг/м*, т. е. в состоянии поршня 17 *кг* на высоту 1 *м*, или одного килограмма на 17 *м*». *Прим. ред.*]

[1] Потому что плотность, отнесенная к водороду, равна половине частичного веса.

[2] Это справедливо не только при 0° и 760 мм. давления, но при всех других температурах и давлениях, лишь бы коэффициент расширения оставался постоянным. Развитие этих понятий помещено в моей статье в химическом журнале 1870 года.

[3] Других простых тел, например Cl, Br, Hg, нельзя взять, потому что они близки к сгущению и потому в них есть внутренняя работа, B для них не = 0.

если через n означить число атомов, заключающихся в частице и если p опять выражает вес частицы. Так, например, для окиси азота NO Реньо дает Q = = 0,2315, для окиси углерода (CO) 0,2479 (для закиси азота (N^2O)=0,2238 и для CO^2 = 0,2164, оказывается В ощутимым — это газы сгущаемые). Поэтому для окиси азота K = 0,2315 — 0,0667 = 0,1648, для окиси углерода K = 0,1765, и для них p·K = 2·2,47. Потому то для настоящих газов, простых и сложных, можно считать хотя приближенно справедливым следующее общее выражение: p·K = n·2,45 (где p — вес частицы). Этот закон показывает, что работа, потребная для приведения разнообразных атомов (вес которых различен) к одной температуре, одинакова. Едва ли будет несправедливо допустить, что для нагревания атомов в разных состояниях тела (твердом, жидком и парообразном) требуется одинаковое количество тепла, то-есть что величина K настолько же [1] постоянна для различных состояний тела, насколько она постоянна для одного и того же газа при разных температурах и для различных газов. Принимая для всех состояний тел $K = 2{,}45\,\frac{n}{p}$, можно легко определить величину внутренней работы, происходящей в телах твердых, жидких и парообразных при их нагревании. Так, например, теплоемкость лития = 0,9408, пай его = 7, следовательно $\frac{n}{p} = \frac{1}{7}$, [2] потому для него $K = \frac{2{,}45}{7} = 0{,}35$, а потому при нагревании его на 1°, на внутреннюю работу расходуется 0,94—0,35 или 0,59 единиц тепла, следовательно, более, чем для самого его разогревания, внешней же работы происходит столь мало, что ее нельзя и сравнивать с вышеприведенными величинами.

Прежде, чем перейти к другим соображениям, относящимся до теплоемкостей, укажем на те следствия, какие вытекают из вышеприведенных данных для газов.

Для газа, частица которого весит p и заключает n атомов, теплоемкость 1-го кило при постоянном давлении = $Q = \frac{2{,}45\,n + 2}{p}$. Один куб. метр газа весит p·0,0448 кило, следовательно, для нагревания на 1° одного кубического метра газа потребуется количество тепла = Q·p·0,0448 или 2,45·0,0448·n + + 0,0896, а потому равные объемы газов будут иметь теплоемкости, независимые от состава атомов, а только от числа атомов, входящих в частицу. Оттого теплоемкости равных объемов O^2, H^2, N^2, HCl, NO, CO и т. п. газов, будут равны между собою, если внутренняя работа в них ничтожна. Также равны между собою будут теплоемкости H^2O, CO^2, N^2O и т. п. газов, потому что для них n = 3. Это следствие оправдывается наблюдениями по числам Реньо.

Таким образом становится очевидным, что по теплоемкости можно судить об относительном числе атомов, следовательно и о весе атома. Так как для газов плотности пропорциональны весам частиц, то из предыдущего следует, что произведения их теплоемкостей на частичный вес газа (Q·p = 2,45·n + 2) будут величинами постоянными для простых и сложных газов, если они заключают равное число атомов. Вот пример: для CO произведение Q·p = 0,248·28 = 6,9, для водорода H^2 это произведение = 3,40·2 = 6,8. Оттого то теплоемкость азота N^2(p = 28) равна теплоемкости окиси углерода CO (p = 28). Очевидно также из предыдущего, что Q·p не пропорционально числу атомов n, а находится только от него в известной зависимости. $\frac{Q \cdot p}{n} = 2{,}45 + \frac{2}{n}$, следовательно, чем больше n, тем ближе частное $\frac{Q \cdot p}{n}$ приближается к постоянной 2,45, но ее не достигает. Для CO оно = 3,4, для C^2H^6O оно = 2,5.

[1] Гирн, Бедекер, Дюпре и пр. считают, что в хлоре не может быть такой значительной положительной внутренней работы, а потому считают, что его частица содержит 3, а не 2 атома, но такое допущение не имеет основания.

[2] Она, как сказано в примечании на стр. 108[= 96,] не изменяется с температурою.

[3] Если в частице лития находится n атомов его, то вес частицы p = n·P, а потому $\frac{n}{p} = \frac{n}{n \cdot P} = \frac{1}{P}$[в оригинале опечатка $\frac{1}{p}$. *Прим. ред*.].

Журнал Русского Химического Общества 1872 г., т. IV, вып. 2, стр. 34.

ВЫПИСКА

из протокола заседания Химического Общества

13 января 1872 г.

2. Д. Менделеев сообщил от имени г. Шмидта, М. Кирпичева и своего, исследование прибора г. Ягна, неописанного еще, но уже находящегося в продаже.[1] Прибор служит для выкачивания воздуха до малой упругости, при посредстве воды, под малыми давлениями, чем он значительно превосходит существующие воздушно-водяные насосы. Действие прибора основывается на инерции воды, движение которой в трубке прерывается пульсирующей (как клапан) каучуковой трубкой, приводящей воду. Исследование прибора состояло в определении отношения (z) между объемами воздуха и воды, проходящих чрез прибор, в зависимости от числа секунд (x), в которые протекает вода, и от наибольшего разряжения (m), которого можно достичь при помощи данного прибора. Результаты привели к зависимости:

$$z = Av(Б - x)^2 (m - x),$$

где $Б$ есть показание баромегра, A — постоянное число. Эта формула подтверждается и на основании изложенной теории прибора.

---

[1] Продается у К. Баранцевича в Москве: Маросейка, д. Лютеранской церкви Петра и Павла.

Журнал Русского Химического Общества 1872 г., т. IV, в. 5, стр. 169—194.

49. ПУЛЬСИРУЮЩИЙ НАСОС

(Из лаборатории С.-Петербургского Университета)

Исследование

Д. Менделеева, М. Кирпичева и Г. Шмидта [1]

Лет 15 или 20 тому назад стали входить в употребление при физических и химических исследованиях разнообразные аспираторы и насосы, действующие падающею жидкостью, которая своим падением увлекает с собою воздух или другой газ. Таковы приборы Гейслера, Бабо, Шпренгеля, Бунзена и др. Степень разряжения, [2] достигаемая или выраженная поднятым столбом той же самой жидкости, которая действует в приборе, не превосходит высоты падения жидкости, а напротив того всегда меньше ее, потому что приборы эти действуют только давлением падающей жидкости и потому что часть его тратится на различные неизбежные сопротивления. Этот принцип составляет общее свойство всех вышеупомянутых приборов. Если например, в насосе Шпренгеля высота падения ртути будет h, то наибольшее разряжение, которого им можно достичь, будет не более этого h, а если это h более барометрической высоты, то конечно можно при посредстве этого насоса достичь и полного разряжения. Точно так же и в насосе Бунзена, действующем водою, упругость воздуха, остающаяся после продолжительного действия прибора, будет более, чем $B - h$, где B означает высоту барометра, выраженную водяным столбом, а h выражает высоту падения воды. Поэтому разряжения здесь прямо зависят от высоты падения жидкости, а следовательно от ее гидравлического давления.

Прибор, подлежавший нашему исследованию, действует на основании совершенно других причин и он в состоянии производить разряжения гораздо бо́льшие, чем те, какие выражаются высотою падения воды или другой жидкости, действующей в нем, хотя он и имеет с вышеприведенными приборами то общее начало, что в нем падающая вода производит разряжение воздуха и увлекает с собою воздух. В сущности этот прибор составляет обратный случай известному инжектору Жиффара или пульверизаторам. Там двигающийся пар или воздух поднимает воду или приводит ее в движение, здесь двигающаяся вода производит разряжение или, вообще, движение воздуха. Он подобен отчасти, хотя

[1] [Эта работа была кроме того напечатана в сокращенном виде, но вместе с тем с некоторыми изменениями в Annalen der Chemie und der Pharmacie, **165**, № 1, 63—91, 1873 под заглавием: «Die Pulsierpumpe (Pompe syrène) von D. Mendelejef, M. Kirpitschoff und G. A. Schmidt. Aus dem Journal des russischen chemischen Gesellschaft. Original-Mittheilung. Hierzu Tafel I (Eingegangen den 13 August 1872»).

[2] [Сохраняем правописание подлинника. *Прим. ред.*].

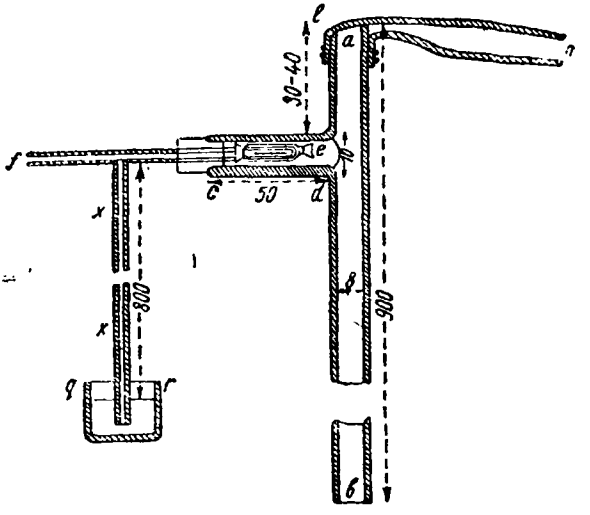
и весьма отдаленно, тарану, в котором движение воды производит движение другой части ее.

Еще в 1870 г. один из нас, в бытность в Москве, в лаборатории Петровско-Разумовской академии, видел этот прибор, устроенный студентом этой академии, г. Ягном; этот последний показывал тогда, что, при посредстве резервуара, стоящего на высоте около $^1/_2$ метра над прибором, имеющим в длину всего менее метра, так что все падение воды не превышало $1^1/_2$ метров, — можно было произвести в сосуде значительной емкости разряжение, доходящее до 720 мм. поднятого ртутного столба, что соответствует поднятию воды до высоты более 9 метров. Теорию своего прибора г. Ягн тогда не объяснял и с тех пор нигде, сколько нам известно, не являлось описание его аппарата, а между тем практические достоинства такого прибора и новизна принципа, введенного в нем, делали желательным как распространение этого прибора взамен воздушных насосов и аспираторов другого устройства, так и изучение этого прибора в отношении его действий. Наше исследование и касается преимущественно этой последней стороны прибора. Мы приступили к нему только тогда, когда узнали, что лицо, доверенное от г. Ягна, продает уже в Москве приборы этого рода и когда таким образом прибор г. Ягна сделался общедоступным. Так как самый прибор нигде не описан, то мы и начинаем наше изложение с его описания. Мы будем называть этот прибор пульсирующим насосом (Pulsirpumpe), потому что пульсирование каучуковых клапанов, в нем находящихся, составляет важнейшую особенность этого прибора.

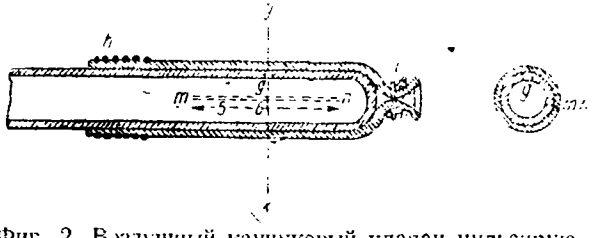
Описание прибора. Главную часть прибора составляет вертикальная стеклянная трубка *ab*, длиною около 900 миллиметров, а внутреннего диаметра около 8 мм. Диаметр этот, сколько показали попытки, сделанные нами, нельзя значительно изменять без ущерба выгодности действию аппарата. Из дальнейшего изложения причина этого будет отчасти понятна; главную же причину составляет в этом случае то, что при уменьшении диаметра трубки *ab*, проводящей воду, трение возрастает, а при увеличении ее диаметра пузырьки воздуха прорываются легко верх, т. е. не следуют за струею воды, протекающей по трубке. Из верхней части аппарата, на расстоянии, примерно в 30 или 40 мм. от верху, находится боковой перпендикулярный тубулус *cd* или горлышко, длиною примерно в 50 мм., а диаметром внутри около 1 сантиметра.

Размеры этой части *cd* аппарата не столь существенны, как размеры части ab, однако и длина трубки *ab* имеет малое значение. Обыкновенно она длиною около 900 мм., но при меньшей длине аппарата действует почти так же, а при бо́льшей длине действие его незначительно увеличивается. Чрез боковой тубулус *cd* проходит трубка *ef*, герметически закрепленная в отверстии *c* при посредстве пробки и сургуча или каучуковой трубки. Во всяком случае лучше, если закрепление этой части будет прочное. Та часть трубки *ef*, которая входит в тубулус *cd*, досигает почти до трубки *ab* и снабжена на конце клапаном, пропускающим из *ef* воздух в аппарат *ab*, но не позволяющим воде из аппарата проходить в трубку *ef*. Клапаны, служащие для этого, составлены были в тех приборах, которые были устроены нами для исследования; напо-

добие бунзеновского клапана с каучуковою трубкой. Такой клапан устраивается следующим образом: конец трубки *ef* запаивается и на нем с помощью острого стального сверла и наждака с терпентинным маслом делается одно или два отверстия *g* перпендикулярно по оси цилиндра. После того на этот конец трубки надевается кусок каучуковой трубки *hi*, именно так, чтобы она далеко закрывала с обеих сторон отверстие *g* и была плотно закрыта со свободного своего конца. Это последнее достигается тем, что часть *i* трубки перевязывается плотно ниткою, а часть *h* затем закрепляется плотною привязкою на трубке, чтобы каучуковая трубка не могла затем быть сброшена с конца стеклянной трубки. На каучуковой трубке *hi* делается предварительно продольный надрез *mn* по направлению оси цилиндра, длиною в 5 или 6 мм. и при надевании каучуковой трубки это отверстие помещается в ином разрезе, чем тот, в котором находится отверстие *g*. Тот угол, который составляют: 1) плоскость, проходящая чрез ось цилиндра и чрез отверстие *g* и 2) плоскость, проходящая чрез ось и разрез *mn*, зависит от свойства каучука. Требование, которому необходимо должны удовлетворять клапаны, состоит в том, что воздух из трубки *ef* должен легко проходить чрез клапан, т. е. клапан не должен представлять для этого прохождения значительного сопротивления, а обратное вхождение воздуха (и воды) в трубку *ef* должно быть невозможно при помощи клапана. Если бы отверстие *mn* совпадало с отверстием *g*, то первое условие было бы удовлетворено в высшей мере, но зато второе не могло бы выполняться. Для того, чтобы оба условия могли быть выполнены, должно брать каучуковую трубку тонкую и легко, но без свободного



Фиг. 1. Схематический чертеж частей пульсирующего насоса.



Фиг. 2. Воздушный каучуковый клапан пульсирующего насоса в увеличенном виде.

пространства, надевающуюся на конец стеклянной трубки *ef*. Если каучук толст, то оба условия плохо выполняются и прибор не дает хороших результатов. Вообще достоинство прибора, как увидим впоследствии и при изложении его теории, зависит весьма значительно от того сопротивления, которое представляет клапан для движения чрез него воздуха. Если бы можно было иметь клапан, не представляющий никакого сопротивления, то можно было бы достигнуть барометрической пустоты, т. е. такой, которая соответствовала бы высоте барометра без давления водяных паров, которые несомненно будут в аппарате, и без давления того воздуха, который растворен в протекающей воде. Чтобы измерить в данном приборе сопротивление клапана, мы употребляем следующий простой способ: в трубку *ab* (фиг. 1) вливается вода так, чтобы воздух из трубки *ef* не проникал в аппарат и чтобы вода стояла ниже тубулуса *cd*; затем верхнее отверстие трубки a закрывается, а вода падает, потому что воздух прорывается чрез клапан *e* из трубки *f*. Если бы клапан не представлял сопротивления, то вся вода бы вытекла, но так как он представляет сопротивление, то вода останавливается в своем падении на некоторой высоте в трубке *ab*, соответствующей сопротивлению клапана. Эта высота достигала в наших аппаратах до 200 и даже 340 мм. водяного столба, что соответствует высоте ртутного столба в 15—25 мм., а потому разряжение не могло уже достигать барометрического на эту высоту. Если прибавить к тому давление водяных паров, равное при обыкновенной температуре приблизительно 15—20 мм. то наибольшее разряжение, которого можно было достигать прибором, должно было доходить до 760—20—20, то есть около до 720 мм. поднятия ртути в манометре и такого разряжения мы в действительности постоянно и достигали в правильно устроенных приборах. Чтобы измерить те разряжения, которые производит аппарат, трубка *ef* сообщается с манометром, устройство которого может быть весьма разнообразно. Мы употребляли в наших исследованиях (фиг. 1 и 4) прямую манометрическую трубку x, погруженную в сосуд с ртутью *qr*. Свободный же конец трубки ef может быть сообщаем с тем сосудом, из которого должно произвести выкачивание или высасывание воздуха, или другого газа, или где надо поднять жидкость (например, при промывании трубок) и т. п. Затем должно описать еще одну существенную часть аппарата, а именно трубку, приводящую воду в прибор *ab* (фиг. 1). Вода доставляется при помощи каучуковой трубки *kl*, один конец которой сообщается с краном водопровода или с краном особого резервуара воды, стоящего несколько выше прибора. Высота резервуара над аппаратом имеет, как увидим, свое значение на результате действий аппарата, но значение несущественное, т. е. при малой высоте падения воды можем достичь значительного разряжения; только при очень малом падении результат может вовсе не достигаться, потому что захлопнется верхнее отверстие трубки *ab* каучуком и вода перестанет течь. Впрочем давление воды, притекающей по трубке *kl*, не должно и превышать известного размера, потому что иначе прибор опять не будет действовать своеобразно, а будет составлять не что иное, как обыкновенный воздушно-водяной аспиратор, вроде прибора Бабо или Бунзена. Для выгоднейшего

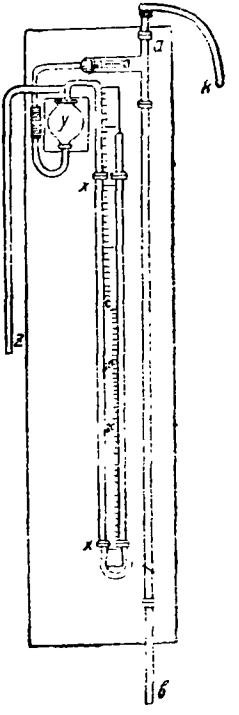
действия аппарата нужно, чтобы вода притекала с известною, впрочем несовершенно определенною, скоростью, которая в обыкновенных условиях достигается весьма легко, регулируя краном, приводящим воду. Это регулирование должно быть производимо так, чтобы вода текла по трубке *ab* с перерывом или пульсацией, которая наступает сама собою, если аппарат устроен правильно, если в верхней части трубки *ab* нет уже воздуха и если вода пущена не очень скоро. Если первые условия выполнены и пульсации нет, кран, приводящий воду, должно немного припереть, пока не произойдет пульсация, темп которой ясно слышен и должен быть не очень част, если желают, чтобы прибор действовал выгодно. Если давление воды будет очень велико, т. е. если кран будет открыт значительно, то пульсаций не произойдет, вода, свободно вытекая, будет увлекать с собою некоторое количество воздуха из *ef*, но будет действовать несвоеобразным способом. Если же давление воды будет мало, т. е. кран будет очень сильно закрыт или высота падения будет очень мала, то темп пульсаций будет медлен и прибор, хотя и будет действовать, но очень медленно, воды будет протекать мало и вследствие того будет уноситься и мало воздуха. Впрочем, не одна быстрота протекания составляет неизбежное условие правильного действия аппарата. Для этого необходимо, чтобы та часть каучуковой трубки *kl*, которая надета на верхний конец *a* прибора, была известным образом на нем закреплена, а эта правильность состоит в том, чтобы надетая часть каучуковой трубки могла легко пульсировать, т. е. попеременно запирать и отпирать верхнее отверстие трубки *a*. Для этого конец каучуковой трубки, надетый на *a*, должен быть натянут несколько вкось и затем клапан перевязан на стеклянной трубке, чтобы не мог переменять приданного ему положения. При таком, несколько косвенном положении, каучуковая трубка может плотно прилегать верхнею своею частью к верхнему концу трубки *ab* и этим способом запирать и отпирать ее, т. е. вводить в трубку *ab* воду, протекающую по *kl*, или прекращать протекание этой воды. Для того, чтобы это неизбежное условие для правильного действия прибора выполнялось с совершенством, необходимо, чтобы каучуковая трубка *kl* имела некоторую длину и была возможно гибкою. Толстая каучуковая трубка не в состоянии быстро пульсировать и запирать стеклянную трубку. Диаметр каучуковой трубки должен быть хорошо соразмерен с диаметром стеклянной трубки так, чтобы каучуковая трубка надевалась с некоторым только трудом на стеклянную трубку. Сверх того необходимо, чтобы часть каучуковой трубки *l*, идущая от стеклянной трубки, опускалась книзу. Будучи наполнена водою, она тянет вниз и тем в естественном состоянии запирает уже отверстие стеклянной трубки и только от напора вновь притекающей воды это запирание стеклянной трубки прекращается и вода врывается из каучуковой трубки в стеклянную. На этом основывается все действие прибора, а потому правильное выполнение всех этих мелочных, повидимому, условий составляет положительное условие надлежащего действия прибора.

Хотя с первого взгляда на устройство аппарата и при первом знакомстве с его частями и может показаться, что прибор прихотлив,

что устройство его сопряжено со случайностями, но это предубеждение исчезает не только при продолжительном обращении с аппаратом, но даже и при знакомстве с его теорией, из которой прямо вытекают все вышеупомянутые условия. Чтобы указать на практичность этого аппарата и на постоянство его действий, достаточно сказать, что первый, устроенный нами в сентябре 1871 года прибор действовал почти ежедневно в течение трех месяцев и ни разу не был исправляем. Он и теперь еще постоянно действует и нами было устроено затем уже значительное число приборов, постоянно действующих в лаборатории Петербургского университета и во всех их действие постоянно и ничем не возмущается и никакой порчи в аппарате еще ни разу не случалось, кроме совершенно случайных и неизбежных в каждом приборе, заключающем стекло и каучук. Заметим, однако, что при сколько либо неправильном устройстве клапана, проводящего воздух из трубки *ef*, часть воды может попадать в трубку *ef* и затем в манометр, а также и далее. Этого не будет, если воздушный клапан устроен правильно. Раз правильно устроенный, он и остается таким в течение месяцев, так что прибор, раз установленный, действует непрерывно. В случае порчи воздушного клапана его, однако, легко заменить и новым. Для предосторожности г. Ягн ставит особый стеклянный шар в той части трубки *ef*, которая ведет к манометру и помещает этот шар таким образом, чтобы манометрическая трубка и трубка, служащая для высасывания воздуха, оканчивались в верхней части шара, как это изображено на прилагаемом рисунке. Трубка, ведущая к воздушному клапану, кончается в нижней части шара. Чрез это, если и попадет из под клапана вода, она будет потом, при новом действии прибора высосана, и вода, пока не наполнится шар, не проберется в манометр и тот аппарат, из которого выкачивается воздух. Впрочем, мы не считаем необходимым устройство такого шара, если воздушный клапан правильно устроен.

Действие прибора. Действие пульсирующего насоса представляет уже само по себе весьма характерное и интересное явление. Когда вода пущена из крана в трубку *ab* (фиг. 1, 3), то замечаются пульсации, т. е. подъем и опускание части каучука *l*, налегающей на конец *a* стеклянной трубки *ab*. В то же время замечается, что в воздушный клапан прорывается воздух и уносится струею воды по трубке *ab* вместе с водою. Притом как вода, так и воздух в трубке *ab*, переменяясь между собою единовременно с пульсацией каучука, также пульсируют, т. е. двигаются вверх и вниз и притом не только нет непрерывной струи вытекающей воды, (она все время прерывается воздухом), но также и нет спокойного втекания воды, а есть ряд толчков воды, или ударов ее, которые составляют существеннейшую принадлежность действия аппарата. Самая каучуковая трубка, приводящая воду, также пульсирует во все время действия прибора, вследствие попеременного втекания и вытекания воды. Если каучуковая трубка не закреплена, т. е. свободно висит, то в ней замечается не только пульсация, совершенно такая же, как в артериях, но и сопряженные с нею змееобразные движения, так что весь прибор во время своего действия становится как бы оживленным и представляет в действительности машину, действующую

живою силою течения воды, как это вслед затем будет объяснено, а потому во всем действии прибора замечается целый ряд явлений, не свойственных обыкновенным, ныне употребляемым приборам, что и возвышает интерес его изучения. Мы думаем, что в дальнейших исследованиях этого снаряда возможно будет перейти от него к действию кровеносной системы в животных, потому что в действии этой системы и пульсирующего насоса представляется много сходного.



Фиг. 3. Общий вид пульсирующего насоса г. Ягна с предохранительным шариком и сифонным манометром *xx*.

Увлекаемый водою воздух будет таким образом высасываться чрез воздушный клапан и если пространство, из которого происходит высасывание, будет ограничено, то воздух в этом пространстве будет разряжаться, если же в это пространство взамен извлекаемого воздуха будет входить новый воздух с некоторою быстротою, то настанет равновесие между количеством воздуха, входящего в трубку *ef* и уносимого из нее чрез воздушный клапан. В первом случае, т. е. когда количество высасываемого воздуха ограничено, манометр прибора будет подниматься все выше и выше, пока достигнет известного наибольшего своего стояния. Эта наибольшая высота манометра, достигаемая при посредстве данного аппарата, зависит, как сказано уже было выше, от устройства воздушного клапана, а также от давления водяного пара и воздуха, растворенного в протекающей воде. Оба эти вещества, т. е. водяной пар и воздух из воды, будут иметь возможность распространяться в трубке *ef*, потому что некоторую часть времени воздушный клапан открыт и, следовательно, чрез его отверстие произойдет диффузия и воздуха, и водяного пара в то пространство, из которого выкачивается воздух. Быстрота, с которою достигается наибольшее стояние манометра, зависит конечно от многих причин, а именно от количества воды, протекающей в единицу времени; от количества воздуха, содержащегося в приборе, из которого выкачивается воздух; от числа пульсаций в единицу времени, а также и от гидравлического давления воды, притекающий в прибор, хотя это последнее в сущности и выражается, при данном диаметре трубки *ab*, скоростью истечения воды. В подобной сложной форме явление очень трудно изучаемо и хотя первые наши опыты и были произведены при помощи сосудов определенной ёмкости, но мы вскоре заменили этот сложный прием другим, более простым, а именно устроили так, чтобы сосуд, из которого происходит выкачивание воздуха, был бесконечно велик, т. е. в прибор бы постоянно притекало определенное количество воздуха, равное тому, которое высасывается прибором втечение того же времени. Подобный случай и будет составлять аспирирование, т. е. постоянное протягивание воз-

духа при посредстве прибора. Если трубка *ef* будет прямо открываться в воздух, то протекающий в воздушный клапан воздух будет иметь постоянное давление атмосферы, а следовательно манометр будет показывать 0. В этом случае аппарат будет обыкновенным аспиратором, хотя и пульсирующим, но его действие в этом случае не представляет какого-либо отличия от действия обыкновенного аспиратора, например, Бабо или Бунзена. Если же затруднить вход воздуха в трубку *ef* при помощи особых приставленных к ней капиллярных трубок, то чрез тонкое и длинное капиллярное отверстие в единицу времени будет входит только некоторое незначительное количество воздуха. Известно, что быстрота протекания воздуха чрез капиллярную трубку зависит от ее длины и диаметра, а также и от разности давления воздуха по обе стороны отверстия, поэтому, если взята тонкая капиллярная трубка, то при первом действии прибора воздух, содержащийся в приборе, будет высасываться с большею быстротою, чем он будет входить чрез капиллярную трубку, и, следовательно, манометр прибора будет подниматься, но, по мере уменьшения давления воздуха в аппарате, быстрота вхождения воздуха чрез капиллярную трубку будет увеличиваться, а быстрота вытягивания его чрез клапан уменьшаться. Вследствие того под конец эти величины приравниваются, т. е. в прибор будет входить чрез капиллярную трубку такое же количество воздуха, какое будет уноситься чрез воздушный клапан водою и при этом манометр прибора покажет известное давление, от которого и будет зависеть действие как капиллярной трубки, так и воздушного клапана. При этом очевидно, что прибор приобретает постоянное действие и потому становится доступным для точного изучения, тогда как, взявши сосуд с воздухом определенного размера, мы будем иметь переменную скорость прохождения воздуха чрез воздушный клапан и переменную высоту манометра, а потому изучение будет тогда весьма затруднительно, тем более, что при разных высотах манометра и действие прибора, т. е. количество воздуха, увлекаемое данным количеством воды, изменяется. Прежде чем описывать результаты опытов, приведем то объяснение действия аппарата, которое мы считали с самого начала наиболее вероятным и в справедливости которого мы и не сомневаемся, после того как подвергли аппарат изучению.

Объяснение действия пульсирующего насоса. Представим струю воды, текущую по трубке с некоторою скоростью и вообразим, что некоторым способом течение этой воды в части трубки прекращено, например при помощи крана или задержано каким-либо иным способом. В нашем аппарате такое прекращение течения производится верхним клапаном *a*, который мы и будем называть водяным. Та часть водяной струи, которая будет таким образом оторвана, станет продолжать свое движение с приобретенною скоростью по силе инерции или вследствие живой силы, которою снабжена ее масса, а потому за тем местом, в котором движение прекращено, образуется пустота. В эту пустоту в описываемом приборе и всасывается a) каучук водяного клапана, что и заставляет его еще плотнее прилегать к краю стеклянной трубки, b) каучук воздушного клапана, который иногда отворяется и дает вход c) воздуху из трубки *ef*.

Если же в эту пустоту ничто не может всосаться, если трубки (стеклянная и каучуковая) не могут изменить еще своей формы, то движение прекращается, т. е. живая сила потратится не только на образование пустоты, т. е. на изменение давления атмосферы, но и превратится отчасти в тепло, и тогда вода займет образовавшуюся пустоту под влиянием атмосферного давления, а потому натяжения каучуков тогда прекратятся и водяной клапан отворится, а воздушный запрется. Если же трубка в состоянии изменить свою форму или если в ту часть ее, где образуется пустота, есть доступ воздуха, как в нашем приборе, то воздух займет образовавшееся пустое пространство. Такое именно явление и происходит в нашем аппарате, когда он сосет воздух из *ef*. Каучуковый воздушный клапан представляет гибкую часть стенок сосуда. Он изменяет свою форму. Цилиндр каучука увеличивается в диаметре, и чрез то открывается отверстие для воздуха, и воздух входит в трубку. Таким образом становится понятною важнейшая часть в действии аппарата. Прочее уже не существенно и может быть подвергнуто разнообразным видоизменениям. Так прекращение тока или остановку воды можно производить другими способами, например, при помощи крана какого-либо (например, при помощи той же падающей воды), попеременно отворяемого и запираемого. Очевидно, сверх того, что вертикальное положение аппарата не составляет необходимого условия для его действия. Явления того же рода, какие совершаются в пульсирующем насосе, происходят нередко и в обыкновенных водопроводных трубах, когда в них прекращают каким-либо способом быстрое течение воды. Запирание водопроводных кранов иногда сопровождается такими толчками, которые соответствуют общеизвестному явлению ртутного молотка и основываются на разряжении или безвоздушном пространстве, происходящем вследствие тех же точно причин, вследствие каких действует и пульсирующий насос. В простейшей форме аппарат будет именно таким, каким его сделал г. Ягн, т. е. с самодействующим запиранием и отпиранием отверстия, приводящего воду, что и делается в приборе помощью водяного клапана. Действие его становится понятным из следующих соображений: представим себе трубку *ab*, наполненную водою и запертую наверху каучуковою пластинкою. Давление водяного столба, помещающегося в трубке, уменьшает давление атмосферы на каучук, а так как на верхнюю его поверхность действует полное атмосферное давление, то каучуковая пластинка втянется в стеклянную трубку. запрет ее и вытекания воды тогда не будет. Если мы при этом представим, что такое явление сопровождается еще вышеуказанным разряжением воздуха под каучуковою пластинкой, то станет очевидно, что по прекращении притока воды каучуковая пластинка плотно запрет верхнее отверстие трубки. Течение воды по трубке и под клапаном уже само по себе уменьшает давление под этим клапаном, если только верхняя поверхность его будет известным образом наклонена к направлению притекающей воды. Если угол наклонения будет велик, т. е. если каучуковая трубка будет составлять только незначительное искривление относительно стеклянной трубки, то удар протекающей воды о каучуковую пластинку будет напрягать ее и запирания не будет;

если же каучуковая пластинка почти перпендикулярна к направлению стеклянной трубки, то при этом легко произойдет запор от причин, выше рассмотренных. Этим объясняется необходимое, выше указанное, условие известного положения конца каучуковой трубки *kl* на верхнем конце стеклянной трубки. Представим теперь, что каучуковая пластинка, т. е. конец каучуковой трубки, или водяной клапан запер отверстие стеклянной трубки и что затем совершилась вышеуказанная потеря живой силы воды, оставшейся за клапаном в трубке *ab*. При этом все равно, взойдет ли из воздушного клапана воздух или не взойдет; во всяком случае вода, оставшаяся в стеклянной трубке, произведет меньшее давление, чем в том случае, когда эта вода находится в движении; притом после образования пустоты и втягивания каучука произойдет обратное движение, поднятие воды в трубке (вследствие действия атмосферного давления) и поднятие (выпрямление) каучука (вследствие упругости). Тогда каучуковый клапан приподнимается, во-первых вследствие удара поднимающейся воды, во-вторых по своей упругости, в-третьих от импульса к обратному движению вверх, а в-четвертых от действия на него напора притекающей из под крана воды. От соединения этих усилий произойдет поднятие каучуковой пластинки, а чрез то и вливание воды из каучуковой трубки в стеклянную. Влившаяся вода вновь произведет разряжение и уменьшение давления под каучуковой пластинкой, ее опять притянет, она опять запрет отверстие трубки и таким образом будет продолжаться пульсация водяного клапана, т. е. всасывание его в трубку, углубление его в ней и отскакивание от нее, т. е. обратное движение и тогда проход в трубку воды, а чрез то и новое возбуждение живой силы во всей воде, помещающейся в трубке *ab*.

Такое объяснение действия прибора удовлетворяет всем исчисленным выше условиям его устройства и показывает, что это есть прибор, действующий живою силою, заключающейся в текущей воде. Так как все явления, сопряженные с действием живых сил, еще сравнительно мало изучены, то мы и считали полезным изучить пульсирующий насос, при чем ограничились только одною стороною дела, а именно изучением отношений между количествами воды в воздухе, протекающими чрез прибор. При этом необходимо помнить, что есть два предельных случая по отношению к воздуху. Первый тот, когда давление воздуха, входящего в прибор, т. е. находящегося в трубке *ef*, есть атмосферное и тогда показание манометра, которое мы везде будем называть чрез *x*, равно 0. Тогда прибор есть обыкновенный аспиратор. Второй предельный случай по отношению к воздуху есть тот, когда манометр прибора достигает своего высшего стояния, т. е. когда прибор не в состоянии уже более вытягивать воздуха и тогда количество вытягиваемого воздуха равно 0, при всяком количестве протекающей воды. Мы будем называть чрез *m* то наивысшее положение манометра, которого можно достичь при посредстве аппарата, и потому когда $x = m$, тогда $z = 0$. Чрез *z* мы обозначаем во всем дальнейшем изложении число кубических сантиметров воздуха, извлекаемых при посредстве аппарата, когда чрез него протечет один литр воды. Этот воздух мы измеряли при той температуре, которую имеет протекающая вода. Собственно

говоря, следовало бы измерять объем воздуха при том давлении и при той температуре, которую он имеет, входя под клапан, но ни величина давления с точностью, ни температура воздуха в этом месте не доступны для точного измерения, а потому z и будет везде принята при температурах, равных температуре воды и атмосферном давлении.

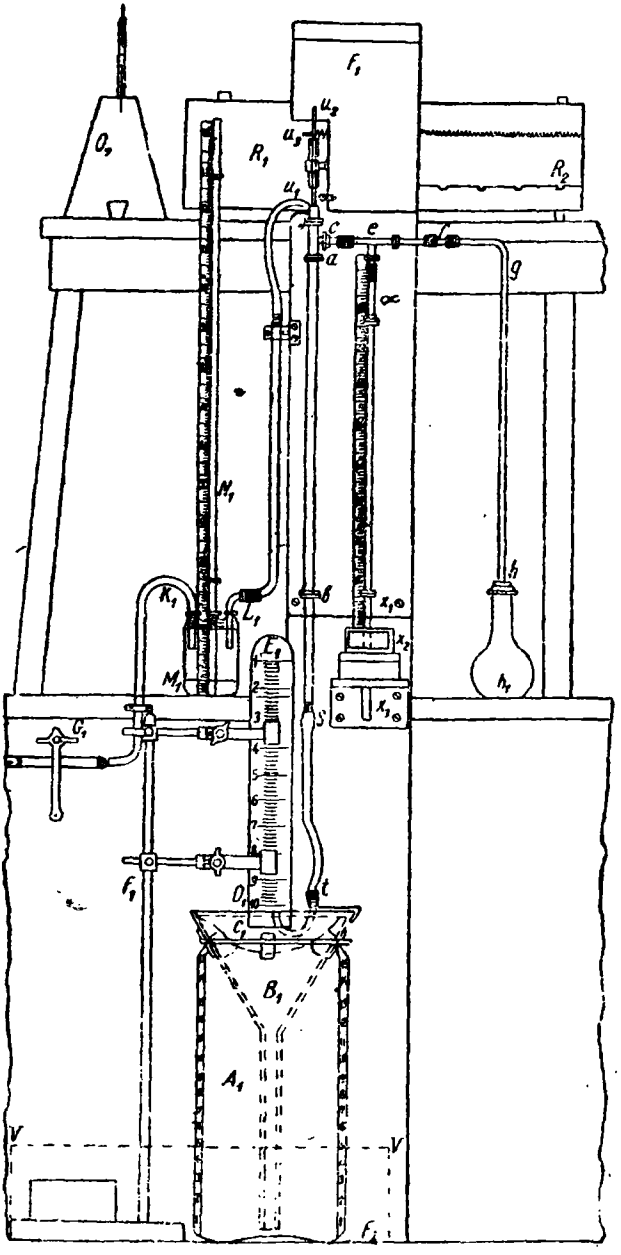
Мы вовсе не будем описывать тех предварительных опытов с сосудами определенной емкости, которые были сделаны нами сперва, потому что результаты этих опытов представляют значительную неодинаковость. Собственно говоря, употребляя сосуды определенной емкости, мы наблюдаем интегральное значение той функции z, которая в дифференциальном своем значении проявляется с большим постоянством в том случае, когда имеется сосуд, неопределенно большой, потому что при ограниченном сосуде давление воздуха в нем постоянно изменяется, а потому и вся функция меняется и мы имеем возможность определять только сложный результат. Так как случай беспредельного сосуда, т. е. постоянного давления, легче было изучать и так как при посредстве его есть возможность перейти к тому случаю, когда количество воздуха ограничено, то мы и остановимся преимущественно на опытах, производимых с неограниченным количеством воздуха. Мы ограничились при этом изучением одного только аппарата, который в состоянии давать разряжение воздуха до манометрического показания, равного 705 мм., следовательно для этого аппарата $m = 705$. Было бы очень важно изучить точно так же и несколько других аппаратов, представляющих возможность достигать до других наивысших разряжений, и чрез это конечно получились бы данные для улучшения пульсирующего насоса. Но так как без дальнейшего изучения мы достигли уже возможности устройства аппаратов, разряжающих воздух до возможной меры (около 730 мм.), как видно в предыдущем, то мы не считали необходимым умножать число изучаемых снарядов. Для дальнейшего изучения прибора нужно было бы видоизменять устройство разных частей (трубок и клапанов), заменить воду различными другими жидкостями[1] и сравнивать действие прибора с другими известными аспираторами и насосами, в начале статьи упомянутыми. Вследствие того, что мы занялись другими исследованиями, мы прекратили начатые в этом отношении опыты и продолжать их более не станем, тем более, что и добытые уже в настоящее время результаты считаем достаточными для решения важнейших практических вопросов, представляющихся при рассмотрении пульсирующего насоса.

Для исследований наших мы располагали аппарат таким образом, чтобы можно было определять скорость и количество воды, количество воздуха, разряжение, при этом происходящее, и число пульсаций. Расположение снарядов, употребленное нами, изображено на фиг. 4-й, а кроме того мы приводим и описание отдельных частей исследования:

---

[1] Мы делали опыты со ртутью, и ртутные приборы действовали совершенно точно так же, как и водяные; они были гораздо короче водяных и представляли меньшую быстроту колебаний.

1) Для определения давления воды, притекающей к прибору, она была проведена чрез трехгорлую вульфову склянку (фиг. 4 M_1), на дно



Фиг. 4. Расположение приборов для изучения действия пульсирующего насоса. Чрез H_1 K_1 притекает вода в насос *ab*, вытекает чрез *st* в чашку C_1, помещенную в воронке B_1, а из чашки течет в банку A_1, где и измеряется. Банки эти стояли при опытах не на полу, как изображено на рисунке, а на подставке VV, а потому трубка *st* была в действительности короче, чем нарисовано. Воздух из сосуда *h*, или из капиллярной трубки, помещенной в *f*, проникал в трубке *e* чрез воздушный клапан и уносился по *ab* в *st* и собирался в колоколе D_1, наполненном водою и укрепленном в чашке C_1 при помощи статива F_1. Число пульсаций водяного клапана при u_1 определялось по числу колебаний штифта $u_1u_2u_3$, записывающего свои движения на вращающейся бумаге стигмографа R_1R_2. На этой бумаге справа (где буква R_2) видна вверху черта написанная пульсирующим штифтом, а внизу черта, изображающая течение времени. Число секунд отвечает числу углублений этой черты, а они производятся при помощи гальванического тока, замыкающегося метрономом Q_1 и находящегося в сообщении со штифтом, пишущим нижнюю линию.

которой была налита ртуть. В одно из горл этой склянки K_1 притекала вода из крана, из другого L_1 она выходила и шла в аппарат.

Чрез третье горло была погружена открытая с обоих концов трубка N_1, доходящая до дна склянки и помещающаяся во ртуть. Притекающая вода производила давление на эту ртуть, и она поднималась в средней трубке до высоты, которую и можно было измерить при посредстве особой шкалы. Впрочем, данные этого рода не имеют большого значения, потому что, вследствие пульсаций, т. е. открывания и закрывания отверстия, водяной манометр не имеет полного стояния и, не успевая падать в короткий промежуток открытия клапана, он показывает только некоторое среднее давление, могущее служить только качественным указателем скорости течения воды, тем более, что от положения склянки по отношению к прибору зависит и самое показание водяного манометра. В сущности он служил нам только указателем для определения быстроты тока воды, равномерности ее течения и правильности действия аппарата. Главным способом для изменения, но не для определения, быстроты тока воды служил нам особый винтовой кран G_1, помещенный пред вульфовой склянкой. Кран был взят зажимной и был надет на каучуковую трубку H_1, приводящую воду в вульфову склянку. По числу оборотов зажимного крана мы приблизительно знали быстроту притекания воды, а следовательно ее давление в аппарате.

2) Средством для определения скорости течения воды служило прямое измерение количества воды, протекшей в известное время чрез аппарат. Для этой цели мы наблюдали время начала и конца опыта при помощи секундомера, действующего механически и записывающего свои показания на стигмографе, сообщенном с аппаратом, как то будет упомянуто далее. Необходимо заметить при этом, что при свободном протекании воды чрез аппарат скорость истечения воды была конечно больше, чем во время самого действия аппарата, потому что во время действия аппарата часть времени вода не притекала и, кроме того, потому, что чрез аппарат протекал единовременно воздух, т. е. струя воды разрывалась струею воздуха. Собственно говоря, непрерывного течения здесь не было и наблюдаемые нами величины не выражают скорости течения воды, они означают только эмпирическим образом количество воды, протекающей чрез аппарат в известное время. Притом, для удобства вычислений и формул мы обозначили чрез t число секунд, в которое протекает один литр воды чрез аппарат. Значит, объем воды, протекающей в 1 секунду, будет $^1/t$ литра; но впрочем эта величина не будет отвечать истинной скорости течения воды, квадрат этого числа нельзя взять для определения живой силы течения воды, потому что истинное время вытекания литра воды нам неизвестно. Наша величина t означает сумму времени, в которое была остановка в притекании и вытекании воздуха, но в эту сумму времени воды вытек один литр. Чтобы показать изменение в скорости течения воды во время опыта и без него, т. е. при непульсирующем водяном клапане и при отсутствии протекания воздуха, приведем хотя следующие числа: перед опытом 28-ым скорость течения без пульсаций t была равна при данном отворении крана G_1, которое у нас обозначалось $15\frac{1}{2}$ следующими величинами: $t = 51{,}4$; $t = 48{,}4$ и $t = 50{,}6$.

Эти различия в величине t зависели от того только, какое измененное положение придавали мы той части каучуковой трубки, которая была надета на верхний конец прибора. Эту часть трубки приходилось тогда держать руками почти в вертикальном положении, так чтобы она не могла затворять трубки, и при этом получалось видоизменение в скорости, хотя отверстие крана и оставалось одно и то же. Этим скоростям отвечали следующие показания водяного манометра. В первом случае, когда t = 51,4, показания водяного манометра были 71—90; во втором случае 30—50, и в третьем 30—70 мм. ртутного столба. При том же самом отворении крана, когда были пульсации, а именно в опыте № 26, время вытечения одного литра воды, было 46″,2 и t = 49″,5 в опыте 27. В первом из них водяной манометр показывал 340—370 мм. давления, а во втором 350—370. Число пульсаций в первом опыте в одну секунду было равно 4,65, а во втором, т. е. в 27, оно не могло быть определено по большой его быстроте, при которой наш стигмограф не мог уже отчетливо действовать.

3) Затем мы определили количество воздуха в кубических сантиметрах, проходящего чрез прибор, когда чрез него прошел один литр воды. Для этого мы поступали следующим образом. Нижний конец трубки *ab* был соединен с короткою каучуковою трубкою *s*, на конец которой прикреплялась короткая загнутая стеклянная трубка *t*, такого же диаметра, как и трубка *ab* прибора. Эта загнутая трубка (фиг. 4) погружалась в чашку C_1 и вводилась в ней под колокол с делениями D_1, назначенный для собирания воздуха и для того предварительно пополненный водой. Вода, протекающая чрез аппарат таким образом, вся собиралась в чашке, в которой был поставлен измерительный цилиндр. В этом последнем собирался весь воздух, проходящий чрез прибор. Наши опыты делались в течение только нескольких минут, и вода во время опытов имела температуру 4°—9°, а помещение, в котором мы производили наблюдения, имело температуру около 15°, а потому собиравшийся воздух в течение опыта, хотя немного, но нагревался. Для того, чтобы судить об объеме, который имел воздух при температуре воды, для этого мы поступали таким образом, что по окончании опыта тотчас измеряли объем воздуха, а потом делали новое измерение по истечении некоторого времени, равного тому, в которое производился опыт. Замечалось очень небольшое увеличение объема воздуха и наблюденное изменение мы принимали равным тому, которое происходило с объемом воздуха в течение опыта. Эта поправка, конечно, ошибочна, но вся поправка выходила столь малою, что дальнейшие, сами собою понятные, более точные исправления, нам казались излишними. Объем воздуха, собравшегося в цилиндре, нужно было затем исправить только на давление водяного столба в цилиндре D_1. Для этого измерялась высота водяного столба в цилиндре над уровнем воды в чашке. Перед опытом чашка была до верху наполняема водою и помещалась неподвижно в воронке B_1, которая оканчивалась в банке A_1 с делениями, по емкости, на литры. Таким образом мы определяли объем воздуха, прошедшего чрез прибор, а в банке, находящейся внизу, объем прошедшей воды. Он был равен объему, наблюдаемому под конец

опыта без объема воды, вытесненной из цилиндра. Мы длили каждый опыт до тех пор, пока или банка, или цилиндр, не наполнялись: первая водою, а второй воздухом. Наша банка имела емкости 16 литров, а цилиндр был емкостью в 1000 куб. сант. Точность в отсчитывании объема воздуха не превосходила 2 куб. сант., точность в определении количества воды была не более 20 куб. сант., а потому в величине z есть уже довольно значительные разницы от несовершенства наблюдений объемов воды и воздуха. Мы не считали ни возможным, ни необходимым довести точность в определении этих величин до возможной степени, потому что все явления, с коими пришлось иметь здесь дело, по самому существу его, не представляют к тому надлежащей возможности. Так, например, часть воздуха растворилась в воде и часть его могла извлекаться из воды, хотя предварительные опыты, сделанные нами в этом направлении, и показали, что величины этого рода незначительны. Так, например, если манометр дошел уже до высшего своего показания, то протекающая вода оказывалась дающею только неизмеримо малое количество воздуха. Если бы мы пожелали сделать более тщательные опыты, то должны были бы их весьма значительно усложнить, а именно взять воду, не содержащую воздуха, и определить затем количество воздуха, растворившегося в воде, что усложнило бы опыты и конечно мы не могли бы произвести их в таком числе, какое было необходимо для первого знакомства с разнообразными случаями действия прибора. В результате мы искали определить каждый раз величину z, т. е. число кубических сантиметров воздуха, измеренного при атмосферном давлении и при температуре воды, увлеченного одним литром протекшей воды, а для этого исправленный объем воздуха делили на исправленный (по количеству воды, вытекшей из цилиндра D_1) объем вытекшей воды. Это частное и есть та величина, зависимость которой от скорости воды, от давления и т. п. мы желали определить. Так как стигмограф или непосредственное наблюдение давали нам число секунд, в которое длился опыт, то мы получали притом единовременно ту величину t, которая входит в дальнейшие вычисления. Если производилось непосредственное наблюдение времени при посредстве секундных часов и определение стигмографом, то мы отдавали предпочтение этому последнему, если получались между временами некоторые разницы, потому что стигмограф был несомненно точнее, как показали нам предварительные определения, чем непосредственное наблюдение времени по секундной стрелке часов.

4) Когда опыты производились с безконечными сосудами, т. е. с волосными трубками, помещенными в *f* (фиг. 4), как было объяснено выше, тогда показания манометра αX_1, находящегося при аппарате, были постоянны. Эти показания мы обозначаем далее чрез X и называем показаниями воздушного манометра, в отличие от показаний манометра водяного, о котором было выше говорено. Отчитывание манометрических показаний производилось при посредстве манометрической шкалы, вертикально поставленной подле манометрической трубки, так, чтобы 0 шкалы приходился при уровне ртути в широком сосуде, в который погружена была манометрическая трубка. Трубка эта

имела в диаметре отверстия около 6 мм., но ни поправок на мениск, ни на температуру ртути мы не производили, потому что смотрели на производимые нами опыты только как на предварительные, думая впоследствии произвести более полные и с надлежащею точностью. От этого и др. несовершенств наблюдений и зависят, вероятно, те незначительные разницы полученных нами результатов от теоретической формулы, какие далее будут встречаться. В том случае, когда взят был сосуд h_1 определенной емкости, т. е. количество воздуха было ограничено, тогда манометрическое показание, втечение опыта, постоянно изменялось, и это то составляет важнейшую причину, по которой данные этого рода представляют малую точность. В самом деле, при этом приходилось поступать так: один из нас наблюдал количество воды, собирающейся в банке, и когда оно достигало одного литра, тогда, по данному им знаку, отчитывались показания воздушного манометра и количество воздуха в воздушном цилиндре, а потому было необходимо единовременное действие трех наблюдателей. Уже это одно обстоятельство само по себе затрудняло получение согласных результатов, а, сверх того, в показаниях манометра тогда не было согласия с действительным давлением воздуха в аппарате, потому что манометр отставал в своих показаниях от действительности, так как для поднятия ртути на известную высоту требуется некоторое время. Опыты с определенными сосудами представляли неточность, сверх того еще и потому, что уровни воды в воздушном цилиндре и в банке для собирания воды были неспокойны от волнения, производимого притекающим воздухом и водою. Правда, что в опытах этого рода представлялась возможность поверить одно действие другим, а именно, по количеству воздуха можно было проверить показания манометра и обратно, по показанию манометра знать количество воздуха, но проверка этого рода именно и убедила нас в том, что нельзя этим путем достичь до надлежащих согласных между собою чисел. Числа становятся согласными при многократном повторении опытов только тогда, когда манометр уже мало изменяется в своем положении, то-есть, когда воздух выкачивается уже мало, когда манометр поднимается уже мало в то время, когда успевает вытечь один литр воды. Несогласие чисел, полученных из манометрических показаний и из непосредственных наблюдений количества воздуха, мы приписали было воздуху, извлекаемому из воды, или воздуху, растворяющемуся в воде. Но это наше предположение оказалось впоследствии, когда мы прибегли к капиллярным трубкам и следовательно к сосудам неограниченных размеров, неверным, потому что при посредстве этого приема мы получали постоянные результаты при различных температурах воды и, сверх того, мы в действительности не нашли ни значительного растворения воздуха в воде, ни выделения воздуха из воды, как думали первоначально.

5) Для определения числа пульсаций или колебаний водяного клапана, то есть конца каучуковой трубки, насаженной на верхний конец стеклянной трубки ab, мы употребляли стигмограф, который обязательно предоставил в наше распоряжение физиологический кабинет университета. Этот стигмограф представляет длинную полосу бумаги,

двигающуюся с определенною скоростью мимо пишущих снарядов. Таких пишущих снарядов было два, один секундный, а другой записывающий колебания или пульсации. Секундный аппарат приводится в движение секундным метрономом, сообщенным с гальванической парой, так что чрез каждые две секунды записывается углубление в черте, соответствующей времени, а чрез 10 секунд это углубление увеличивается. Вместе с тем, на той же полосе бумаги r_1 r_2 записывается и число колебаний или пульсаций прибора, так что можно было проэктировать время на число пульсаций и потому считать число пульсаций втечение известного числа секунд, а следовательно и знать число пульсаций s, происшедшее в одну секунду. При этом на бумаге отмечались также начало и конец опыта, с помощью точек, а потому было возможно стигмографом определить и длительность всего опыта. Что касается до записывания колебаний каучуковой пластинки прибора, то оно производилось таким образом, что на продолжении трубки прибора *ab* над водяным клапаном устанавливался вертикально движущийся штифт с тупым внизу концом, лежащим постоянно на каучуковой трубке. Этот штифт изображен на фиг. 4 буквою u_1 u_2. Для того, чтобы движение этого штифта было только вертикальное, он был окружен неподвижною стеклянною трубкой u_3, не позволяющей штифту переменять значительно свое положение. Верхний конец штифта оканчивался рычагом, на котором и был насажен карандаш, надавливаемый на бумагу стигмографа легким грузом, а именно гирею в 50 гр., привешенной на нити, висящей вправо от прибора. Карандаш нагнетался таким образом в правую сторону и на этой стороне он упирался в бумагу стигмографа, которая проходила в этом месте по направлению, перпендикулярному плоскости нашего рисунка.

Заметим здесь, что при посредстве стигмографа, бывшего в нашем распоряжении, мы могли получать отчетливые показания только тогда, когда скорость колебаний не превышала 5 ударов в секунду, т. е. 300 ударов в минуту. Так как при малых давлениях высасываемого воздуха число колебаний выше этого, то мы для них и не имеем данных относительно числа колебаний. При том, и не все наши опыты были произведены со стигмографом, а потому мы не входим в дальнейшее рассмотрение тех результатов, которые получили со стигмографом. Они дали нам только понятие о явлении, но показания стигмографа не введены в наши формулы. Однако, уже из тех чисел, которые получены, можно видеть некоторую зависимость между числом колебаний и действием прибора, что и указывается в конце изложения.

Из предыдущего очевидно, что степень точности, которой мы достигли в опытах, произведенных нами до сих пор, незначительна и это зависит, как было уже упомянуто, от того, что мы предполагали затем сделать и более точные опыты. Зато мы стремились по возможности варьировать данные и сделали наблюдения при доступных изменениях во всех возможных отношениях, при одном и том же аппарате. Так времена t вытечения одного литра воды в наших опытах изменяются 15″—50″ и должно заметить, что значительная скорость истечения при том же отверстии, а следовательно и значительное давление, не произво-

дят благоприятных, а, напротив того, дают менее благоприятные условия для действия аппарата. Когда время t велико, т. е. когда скорость мала, тогда при прежних равных условиях на то же количество воды извлекается большее количество воздуха. В практике, конечно, иногда важно сократить время, а не расход воды, а потому вопрос этого рода необходимо решать для каждого отдельного случая, что и возможно при посредстве результатов, добытых нами. Здесь нужно упомянуть также о том, что обыкновенно наши опыты производились при посредстве водопроводных кранов в нижнем этаже университетского здания, тогда как водяной бак находится под кровлею здания на высоте, превышающей 40 футов. Поэтому можно было думать, что такие значительные высоты падения воды имеют огромное влияние. Но, зная, что отверстие нашего прибора равно 20 кв. мм., мы можем вычислить, что скорость вытечения, равная 50″ на 1 литр, соответствует давлению всего столба воды в 3 метра, что и достигалось в наших опытах уменьшенным отверстием крана, приводящего воду. Показания водяного манометра подтверждают это суждение. В большинстве случаев водяной манометр показывал около 300 мм. давления. Эта высота соответствует $3^1/_2$ метрам высоты воды. Особенно убедительное доказательство тому, что значительный напор воды, бывшей в нашем распоряжении, нисколько не помогал действию прибора, мы получили тогда, когда заставили действовать один из аппаратов при помощи бака, помещенного в той же комнате, и над[1] аппаратом, на высоте 140 сантиметров, т. е. 1,4 метра. При этом быстрота вытечения была равна 60″ на 1 литр воды, и аппарат действовал (это был другой, а не тот, который мы изучали) точно так же, как и при доставлении в аппарат воды из водопровода, когда скорость истечения была та же самая. В этом видно несомненное доказательство того, что напор высокого столба воды в действии аппарата нисколько не участвует или, если участвует, то в такой ничтожной мере, какая не уловлялась нашими опытами. Напротив того, при быстром вытекании воды (тоже при значительно отворенном кране G_1 и при значительном давлении воды) данное количество воды извлекает меньшее количество воздуха, чем при более медленном истечении, т. е. когда t больше. Сверх измерения скоростей вытечения воды или давления, мы старались видоизменять возможным образом показания воздушного манометра, то-есть, производили опыты с безконечными сосудами при разных показаниях воздушного манометра. Эти показания X видоизменялись в наших опытах от 0 до 635. При больших показаниях нельзя было делать точных наблюдений, потому что тогда количество воздуха, высасываемого одним литром воды, было уже черезчур мало. Разниц в показаниях воздушного манометра мы достигали, употребляя различные капиллярные трубки, которые насаживались герметически на конец трубки *ef*. Употребляя тонкие и длинные трубки, мы дозволяли входить в прибор только такому малому количеству воздуха в единицу времени, что равновесие между приходящим чрез капиллярную трубку воздухом и уносимым аппаратом на-

[1] [В подлиннике, повидимому, опечатка: «под» вместо «над». *Прим. ред.*]

ступало только при очень значительных разряжениях, а употребляя широкие трубки, мы достигали того же постоянства X при малом давлении. Вследствие разницы в упругости воздуха, выкачиваемого прибором и вследствие изменения скорости воды, мы достигли того, что могли значительно изменять Z при постоянном действии прибора, т. е. при употреблении данной капиллярной трубки и той же скорости воды, а именно величина Z изменялась в наших опытах с капиллярными трубками от 5 до 320 куб. сант. воздуха на 1 литр воды. Только при таких значительных вариациях в величине Z было возможно, несмотря на некоторые неточности опытов, найти действительную зависимость между величинами Z, X и t, что и составляло нашу истинную задачу. Для решения ее служили нам целые ряды опытов, но мы не описываем их во всей полноте, а берем только те из наших опытов, которые служили для вычислений формулы, выражающей зависимость между X, Z и t. Свод наблюдений, произведенных нами, сделан в прилагаемой таблице.

№ опыта	Давления воды в миллиметрах ртутного столба	Число пульсаций в 1 секунду по стигмографу s	Число секунд вытекания литра воды в течение опыта t	Показание воздушного манометра X	Число куб. сант. воздуха, увлеченных литром воды при температуре воды и давлении атмосферы Z
Многие опыты	Разные давл.	—	Разные	705	0
19	360	3,37	20	635	1,0?
23	470	3,95	28,3	548	5,8
14	—	—	—	487	11,5
13	—	—	37,7	421	19,2
29	740	4,07	15,8	370	19,2
21	435	4,41	30 0	308	31,7
25	475	4,70	27,9	322	32,5
20	420	4,43	29,6	310	34,0
26	355	4,65	46 2	275	50,4
12	—	—	36,9	261	53,7
28b	725	—	16,2	0	97,4
11	—	—	28,1	132	118,0
28a	630	—	17,2	0	119,3
24	495	—	30,0	0	153,2
10	—	—	27,3	30	155,2
27	360	—	49,5	0	315,8

Чтобы дать образец того, как добыты полученные нами результаты, мы приведем одно из многих наблюдений. Так, 30 декабря 1871 года, был произведен опыт № 25 с капиллярною трубкою, тою же, что и в опытах №№ 20 и 21. Начало опыта было 1 ч. 24′30″, а конец опыта в 1 ч. 28′40″. Опыт начинался только тогда, когда воздушный манометр достиг до определенного показания, а именно, когда X было равно 322 мм., количество воды, собранной в банке, было равно 11,200

литра, а количество воздуха, непосредственно измеренное, было равно 364 куб. сант.; с поправкою на давление воды и температуру (отрицательное давление водяного столба равно 325 мм.) оно равно 352 куб. сант., следовательно, количество воды 10,836 литров, а потому Z = 32,5 куб. сант. и t = 27,9. По показаниям стигмографа, длительность опыта равна 301″, по непосредственному же наблюдению времени она равна 295″. Так как мы предпочитаем стигмографское определение непосредственному, то по нему и вычислено время t. По записи стигмографа оказалось число пульсаций s = 4,70 ударов в 1″, а потому во все время опыта произошло 1415 ударов. Вследствие этого, в течение одного удара или за один раз врывалось в прибор 7,64 куб. сант. воды и 0,25 куб. сант. воздуха. Так как емкость всей трубки, употребленной для наших опытов, равняется 38 куб. сант., то в одну пульсацию наполнялось в этом опыте водою только $\frac{7,64}{38}$ или $^1/_5$ емкости трубки. Подобным же образом мы получали и все данные, которые приведены в таблице.

Кроме приведенных здесь опытов, были произведены и многие другие, как было выше упомянуто. При этом был целый ряд опытов, в которых скорость течения воды, т. е. отворения крана, была одна и та же, но капиллярные трубки были различны, а потому и высоты воздушного манометра X были различны. Опыты подобного рода можно подобрать и между теми, которые приведены в приложенной таблице. Так например, опыты 23, 25, 20, 11 и 10 представляют почти одну скорость течения воды, а именно t равно около 27—29. Отобрав подобные опыты, можно узнать зависимость между Z, т. е. количеством воздуха и давлением воздуха x независимо от скорости течения воды. Сличения подобного рода, многократно сделанные, показали, что Z почти прямопропорционально квадрату разности M (наибольшего показания манометра) и x, т. е., не обращая внимания на скорость течения воды или, правильнее сказать, при одной и той же скорости течения воды

$$Z = A(M - x)^2.$$

Справедливость этой формулы проверяется тем, что из таких наблюдений, при которых x невелико, можно определить M, т. е. наибольшее показание манометра, какого можно достичь при помощи прибора. В нашем приборе эта величина M была равна, как указано выше, 705 мм.

Если же отобрать такие данные, в которых манометрические показания почти одинаковы, то можно судить о зависимости Z от скорости течения воды t. Так например, в опытах, приведенных в таблице под №№21, 25 и 20, показания манометра близки к 315, а в №№ 28b, 28a, 24 и 27 x = 0, а скорости изменяются от 16″ до 50″ на литр воды. Сличения этого рода показали с другой стороны, что при одном и том же показании манометра, Z тем больше, чем больше t, т. е. чем тише течение воды. Однако, отношения этого рода зависят несомненно также и от манометрических показаний. В этом можно убедиться, группируя данные, приведенные в таблице, как это мы сделали, на три группы, сообразно величинам манометрических показаний. Эти три группы получим, если распределим все данные по величинам x'ов и среднее из

каждой группы будет 106 мм., 308 мм. и 485 мм. Для каждого данного в группе определим $\frac{z}{t(M-x)^2}$ и из полученных таким образом чисел для каждой группы среднее. Оно оказалось для первой группы равно 12,3, для второй 7,7 и для третьей 7,2, то-есть явным образом уменьшается с увеличением манометрических показаний. Эта зависимость проще всего выражается так

$$1\,000\,000\,\frac{z}{t(M-x)^2} = 12{,}3 - 0{,}0153\,x.$$

Вторая часть по упрощению оказывается равною 0,0153 (804 — x), следовательно $z = A(804-x)\,t(M-x)^2$, где $A = \frac{0{,}0153}{1\,000\,000}$. В сличениях этого рода необходимо было принять во внимание, что наши опыты не обладают возможною степенью точности, да едва ли и можно требовать от сличений подобного рода каких-либо других результатов, кроме приблизительно верных. О приблизительной верности выставленных выше результатов мы судили потому, что выражали графически зависимость между z и двумя вышевыставленными условиями, то-есть скоростью и манометрическим показанием и сличали полученные таким образом кривые с теми, которые вычисляются на основании вышеуказанной формулы. Сличения показали удовлетворительность формулы. Приняв это во внимание, видно, что последняя формула заключает в себе постоянные числа 804 и M = 705, а потому можно было думать, что в действительности будет существовать зависимость между действием прибора и барометрическим показанием, которое в среднем числе равно 760 мм. Действительно, (804 — x) (705 — x) весьма близко к $(760-x)^2$. Разница этих произведений находится конечно в пределе погрешности наблюдения, а потому весьма вероятно было заключить, что действительная законность определяется следующим уравнением:

$$z = At(760-x)^2(M-x).$$

Такой вывод удовлетворяет важнейшим явлениям прибора, потому, прежде всего, что показывает прямую зависимость z от t и показывает, что когда x = M, тогда z будет равно 0, т. е. извлечения воздуха не будет тогда, когда манометр достигнет до своего наибольшего показания. Величина M поэтому должна зависеть от устройства прибора, а величина A составляет характеристику, которая может быть зависит от особенностей прибора, но вероятнее всего зависит от условий, общих всем приборам этого рода. Чтобы убедиться в справедливости выведенной выше формулы, были отобраны те из наблюдений, которые представляют наибольшее взаимное сходство и представляют наибольшую вероятность результата и из таких опытов взяты были средние, как наиболее вероятные. Так, из №№ 21, 25 и 20 получено среднее число, в котором z = 32,7, t = 29,2 и x = 313; из опытов №№ 24 и 10 получились средние z = 154,2, t = 28,6 и x = 15; из двух опытов под № 28 получилось z = 108,3, t = 16,7 и x = 0; из опыта же 27 z = 315,8, t = 49,5 и x = 0. Для этих чисел было вычислено частное $\frac{z}{t(760-x)^2}$ и оно оказалось при помножении на

1 000 000 равным для первого ряда опытов 6,145, для второго 9,714, для третьего 11,228, для четвертого 11,045. Графическим способом легко убедиться, что эти числа находятся в линейной зависимости от манометрического показания X, а именно, обозначив эти данные через y, находим, что $y = 11{,}136 - 0{,}0160$ [1], а так как по предполагаемой формуле эти числа должны быть равны A(M—X), то отсюда выходит, что $M = \frac{11{,}136}{0{,}0160} = 696$, — в наших же опытах, как было уже упомянуто, M = 705. Такая близость по формуле найденного M от действительно наблюдаемого показывает, что вышеприведенная формула отвечает действительности в надлежащей мере, т. е. удовлетворяет опытам в пределе точности наблюдения. Итак, результаты наших опытов могут быть выражены для нашего прибора следующею формулою.

$$z = A\,t\,(760 - x)^2\,(705 - x).$$

Поэтому легко было найти величину A из предыдущих опытов. Взявши вышеуказанные средние числа, находим, что среднее значение для A равно $\frac{0{,}01534}{1\,000\,000}$. В этом числе взяты во внимание показания неодинакового достоинства, а взяв только крайние пределы, а именно средние из №№ 21, 26, 20 и 27, которые дают почти одно и то же значение для A, найдем, что оно равно 0,01568, а потому вся зависимость выражается следующим образом:

$$Z = \frac{t\,(760 - x)^2\,(705 - x)}{63\,775\,000}.$$

Логарифм знаменателя равен 7,80465, а выражая давления в метрах, получим, что $Z = 15{,}68\,t\,(0{,}76 - x)^2\,(0{,}705 - x)$. Весьма вероятно, что в этой формуле вместо 0,76 надо полагать в действительности истинное показание барометра Б, но наши опыты не достаточно продолжались, чтобы решить этот вопрос с ясностью, а потому мы считаем весьма вероятным, что истинная формула, выражающая зависимость, есть следующая:

$$Z = A \cdot t\,(Б - x)^2\,(M - x),$$

где Б есть показание барометра, а M есть наибольшее показание манометра, характеризующее прибор. Должно было бы особыми опытами решить, изменяется ли сколько нибудь величина A при переходе от одного прибора к другому. То незначительное число наблюдений, которое мы сделали с другими приборами, показывает, повидимому, что этого изменения нет и что характеристику прибора составляет только величина M, ему свойственная. Если бы это оправдалось дальнейшими наблюдениями, то нужно было бы вывести эту величину A теоретически, а она по опытам с нашим аппаратом близка, как видно из предыдущего, к 15,7.

Не вдаваясь в рассмотрение постоянной величины, мы старались, найдя вышеприведенную формулу, оправдать ее теоретическими соображениями, основанными на том представлении о действии прибора, которое приведено было выше. Мы изложим теперь соображения, пока-

зывающие, что выведенная из опытов формула вытекает из теоретических оснований, объясняющих действие пульсирующего насоса. В самом деле, вытягивание воздуха в пульсирующем насосе происходит под влиянием разности давлений по обе стороны воздушного клапана. Давление воздуха по одну сторону клапана надо принять равным Б—x, так как манометрическое показание зависит от разности упругости оставшегося в приборе воздуха и давления атмосферы. Во сколько раз упругость в одном случае будет больше, чем в другом, во столько раз в первом пройдет больше чрез клапан воздуха, чем во втором, и z будет вследствие этой одной причины пропорционально Б — x. Но надо представить себе, что при одном и том же отверстии воздушного клапана успевает прорываться в короткий промежуток пульсации только один и тот же объем воздуха, содержащегося по другую сторону клапана. Так как этот воздух тем более разряжон, чем более Б — x, то, меряя прошедший чрез клапан воздух при обыкновенном давлении, мы получим в результате различные объемы воздуха, а именно: если воздух имеет упругость, равную Б в одном случае, а в другом Б—x, то объемы, измеренные при давлении Б, будут относиться между собою так, как Б относится к Б—x. Следовательно, так как z показывает объем воздуха, измеренного при обыкновенном давлении, то вследствие этой причины, оно вновь должно быть пропорционально Б—x, следовательно, в результате оно выйдет уже пропорционально $(Б—x)^2$, если допустить, что в каждый удар воздушного клапана успевает прорываться одинаковый объем воздуха, содержащегося по другую сторону клапана. Это последнее предположение в действительности, конечно, будет неверно. С той стороны клапана, которая находится в воде, каждый раз давление будет одинаковым и именно будет равно или почти равно 0, но по другую сторону клапана давление будет с каждым новым ударом клапана все менее и менее, если взять сосуды определенных размеров, а потому клапан будет отворяться все меньше и меньше, так как он сам обладает известною степенью упругости и может отворяться только при известном перевесе давления с внутренней его стороны. Предполагая отверстие клапана щелью, которая расширяется только по своей ширине и тем дает проход воздуху, и соображая, что площадь отверстия увеличивается с увеличением широты отверстия, найдем, что величина отверстия будет находиться в обратном отношении к манометрическому показанию, т. е. при увеличенном показании манометра, при значительном x отверстие будет уменьшаться и оно сделается равным 0, когда x достигнет некоторой предельной величины M. Это M и будет зависеть от свойств клапана и его сопротивления открыванию. Вследствие этой-то причины, сверх всего предыдущего, z зависит от величины M—x, где M есть данное, определяемое свойством воздушного клапана, имеющегося в приборе. Таким образом, z, кроме двух предшествующих зависимостей, состоит еще в прямой зависимости от M—x. Соображения подобного же рода оправдывают и зависимость z от t.

Для суждения о значении пульсаций, мы сличали количество пульсаций на 1 литр воды. Помножая t на s, мы узнаем это число. Число

пульсаций, совершившихся таким образом при вытекании одного литра воды, показывает, что здесь есть громадное различие и, повидимому, скачки весьма значительные. Так, напр., в опыте 19 и 29, при протекании одного литра воды совершилось 67 и 64 пульсации. Значит, в одно колебание наполнилась при этих опытах почти половина трубки, потому что, если бы цельная трубка наполнилась в одну пульсацию водою, то на литр воды произошло бы около 26 пульсаций, так как емкость всей трубки = 38 куб. сантиметрам. Вычисляя подобным же образом данные для опытов 23, 21, 25 и 20, находим, что тогда число колебаний было равно около 130 на один литр воды, то есть вдвое более, чем в предыдущем ряде случаев, хотя, вообще говоря, число пульсаций здесь и было почти то же самое, в одну секунду, как и в предыдущих примерах, а именно около 4 с небольшим в одну секунду. Время истечения t одного литра при этом увеличивалось почти вдвое, но число пульсаций оставалось то же самое, а потому и количество воды, протекшей в одну пульсацию, возросло почти вдвое. Но, однако, из этого не следует заключать, что число пульсаций на один литр воды зависит от времени истечения одного литра, потому что опыт 26 показывает, что, когда время истечения одного литра воды сделалось равным 46,2, число пульсаций возросло до 4,65 в одну секунду, а потому число пульсаций на один литр сделалось тогда равным 215, т. е. почти в четыре раза превышало тогда число пульсаций на один литр в первых примерах. К сожалению наши опыты, произведенные со стигмографом, не дают возможности произвести дальнейшего сличения по своей ограниченности. Однако, из тех чисел, которые здесь приведены, уже видно, что в одну пульсацию входит количество воды, гораздо меньшее, чем то, которое наполняет прибор, а именно в первом ряде опытов втекающая в одну пульсацию вода занимает, примерно, около $\frac{1}{2}$ трубки прибора, в других около $\frac{1}{4}$, а в опыте 26 только около $\frac{1}{8}$ трубки.

Вообще говоря, времена пульсаций мало зависят от скорости притекания воды. Они остаются почти постоянными при очень значительных разницах в величине t. Так, напр., в 21 опыте $t = 30$, $s = 4{,}4$; в 26 опыте $t = 46$, а $s = 4{,}5$; в 25 опыте $t = 30$, а $s = 4{,}7$, скорее можно думать, что есть некоторого рода кратная зависимость между емкостью прибора и количеством воды, втекающей в одну пульсацию.

Имея в вышеприведенных соображениях данные для бесконечных сосудов, легко применить их к тем случаям, когда пульсирующий насос употребляется как аспиратор для постоянного протягивания воздуха. Если бы действовал в этом случае наш аппарат, то можно рассчитать, что при нулевом показании манометра, т. е. при вытягивании газа, имеющего упругость атмосферного воздуха, при малой скорости течения воды, а именно когда литр ее протекает в 50″, извлекается одним литром воды около 320 куб. сант. воздуха или около $\frac{1}{3}$ объема воды. Так как z или объем воздуха пропорционален t, то-есть, временам истечения одного литра воды, то, следовательно, во всяком случае,

какова бы скорость течения воды ни была, извлекается только такое количество воздуха, а именно нашим аппаратом в течение одной минуты извлекается не более 320 куб. сант. воздуха. Устраивая несколько аппаратов, — а устройство их, как видно из предыдущего, весьма легко и просто, — можно таким образом извлекать значительные количества воздуха, расходуя однако на 1 объем воздуха около 3 объемов воды. В этом случае наш аппарат конечно будет представлять плохой механический деятель, и аспираторы другого рода, в которых не будет сопротивления клапанов, будут конечно выгоднее его. Выгодность пульсирующего насоса начинается только тогда и проявляется в значительной мере только там, где требуется произвести разряжение, достигающее до 600—700 мм. ртутного столба, т. е. где нужно произвести значительную работу, потребную на разряжение воздуха, а не одно его перемещение с одного места на другое. При нормальном давлении в этих случаях пульсирующий насос представляет простейший и наиболее удобный из всех, ныне существующих, потому что представляет малую ценность, занимает мало места, требует сравнительно немного воды и действует постоянно без всякого присмотра. Задачи же такого рода встречаются постоянно не только при физических, химических и физиологических работах, но и в технической практике, в особенности на таких заводах, где производятся испарения или перегонки в разряженном пространстве, например, при испарении сахарных сиропов, при изготовлении консервов и тому подобное. Так как аппарат в состоянии, выкачивая воздух, поднимать на соответственную высоту воду или другую жидкость, то можно его применять там, где требуется подобного рода поднятие, например при промывании узких трубок жидкостями, при наполнении ими высоких сосудов, при поднятии кислот по стеклянным или свинцовым трубам на значительные высоты и т. д. В лабораториях особенно пригоден пульсирующий насос для фильтраций под малыми давлениями, для выкачивания воздуха из эксикаторов и для перегонок в разряженном воздухе. Чтобы дать руководительные начала для тех случаев применения пульсирующего насоса, когда выкачивание производится из сосудов определенной емкости, мы вывели, на основании вышеприведенной формулы, зависимость между объемом выкачиваемого воздуха, разряжение которого достигают при этом, временем, на то потребным, и количеством расходуемой воды, так как отношения этого рода и составляют практически важные вопросы при употреблении прибора.

Формула, показывающая отношение z между количеством воздуха n и воды l, проходящих в пульсирующем насосе, есть:

$$z = \frac{n}{l} = A \cdot t(Б - x)^2(M - x).$$

Эта формула выведена нами из ряда опытов, в которых, как описано выше, вместо сосудов, мы употребляли волосные трубки, из нее видно, что z не зависит от абсолютной величины n и l, а следующая формула останется верной и при бесконечно малых значениях n и l, т. е. и

$$\frac{dn}{dl} = At \cdot (Б - x)^2(M - x). \quad (1)$$

При сосудах некоторой емкости v определить зависимость между количеством вытянутого воздуха и манометрическим показанием x можно так: если в сосуде v воздух разряжен от атмосферного давления Б до давления x, то в нем осталось воздуха $v \cdot \frac{x}{Б}$, а, следовательно, выкачалось $n = v \cdot \frac{Б-x}{Б}$, дифференцируя это равенство, получим $dn = -\frac{v\,dx}{Б}$, а подставляя в уравнение (1) и определяя из него dl, получим

$$dl = -\frac{v}{Б \cdot A \cdot t\,(Б-x)^2\,(M-x)} \cdot dx.$$

Эта формула дает возможность определить количество воды dl, которое необходимо употребить для того, чтобы в сосуде емкости v разрядить воздух от x до $x + dx$; все же количество воды l, которое должно протечь чрез прибор для разряжения воздуха в сосуде объема v от атмосферного давления Б до некоторой величины x, выразится интегралом

$$l = -\frac{v}{A \cdot Б \cdot t} \int_{Б}^{x} \frac{dx}{(Б-x)^2\,(n-x)}$$

или, производя интегрирование:

$$l = \frac{v}{A \cdot t \cdot Б \cdot (Б-M)^2} \left\{ \log \left(\frac{Б-M}{M-x} \cdot \frac{M}{Б} \right) - \frac{Б-M}{Б-x} \cdot \frac{x}{Б} \right\}.$$

При помощи этой формулы, мы получили возможность проверить все полученные нами результаты и наше основное равенство $z = A \cdot t \cdot (Б-x)^2\,(M-x)$. Производя разряжение воздуха в сосудах определенной емкости, мы определяли непосредственным измерением и вычислением количество воды, необходимое для производства известного разряжения, и всегда результаты были очень согласны между собою, что можно видеть из следующих двух примеров.

Для разряжения воздуха из сосуда емкости 2600 куб. сант. от барометрического давления 0,759 м. до 0,190 м., при такой скорости вытекания воды, что в 10″,2 проходит 1 литр чрез прибор, потребовалось 15,8 литра воды, а по вычислению должно было бы пройти воды 15,4 литра. Тот же сосуд емкости = 2600 куб. сант. при скорости воды такой, что 1 литр воды вытекает в 40,3 сек., для разряжения до 0,210 м. потребовалось воды 5 литров, а по вычислению 4,6. Из сосуда той же емкости, при истечении 1 литра в 25″, для разряжения до $\frac{1}{2}$ атмосферы идет воды по опыту 25,5 л., по вычислению около 25.

После такого полного совпадания наших формул с практикой и наших опытов с нашей теорией действия прибора можно положиться на предложенную выше теорию прибора и на вытекающие формулы и привести следующие результаты, выведенные из формул и опытом нами не проверенные. Принимая, что прибор мало отличается от нашего и что средняя скорость истечения литра воды = 25 сек. для разря

жения воздуха в литровой стклянке: 1) до $\frac{1}{2}$ атм. потребуется 20 литров воды и времени пойдет около 8,5 мин. 2) до $\frac{3}{4}$ атм. — 110 л. воды и времени —45″. Из 20 л. колокола для получения $\frac{1}{2}$ атм. надо пролить 200 л. воды и времени пойдет 1 ч. 23 мин. Практические достоинства прибора и теоретический инетрес его конструкции позволяют надеяться на то, что он будет распространяться и подвергаться новому, более подробному, чем наше, изучению.

Февраль 1872 г.

Журнал Русского Химического Общества 1872 г., т. IV, вып. 4, стр. 102—103.

ВЫПИСКА

из протокола заседания Русского Химического Общества

2 марта 1872 г.

7. Д. Менделеев сообщил об изменении плотностей газов с давлением, следующее: Реньо указал, что все газы, кроме водорода, уплотняются более, чем следует по закону Мариотта; но невероятно, чтобы это продолжалось и далее, ибо тогда такие несгущаемые газы, как кислород и азот, можно было бы сдавить до плотностей больших, чем у воды, а судя по их весу атома, они должны иметь даже в жидком состоянии плотности незначительные, а потому должно ждать, что газы при некотором давлении будут сжиматься гораздо менее, чем следует по закону Мариотта. Это и видно из наблюдений Румфорда и Родмана над пороховыми газами и из опытов Наттерера, которые при взаимном сличении представляют согласный результат, показывающий, что есть общий, отличный от Мариоттова, закон изменения плотностей газов, потому что условия названных опытов (температура и количество газов) весьма различны, а результаты близки. Если же при некотором давлении такой газ, как воздух, будет сжиматься менее, чем следует по закону Мариотта, то при переходе от малых (как у Реньо) давлений к большим (как у Наттерера) он будет следовать закону Мариотта. Известные ныне данные заставляют думать, что это произойдет для воздуха при 40 метрах давления (53 атмосферы). Поэтому, если существующие наблюдения верны, Мариоттов закон не есть закон, справедливый для предельного состояния газов, как думают все, а будет применяться только при некотором высоком давлении, раньше которого отступления будут итти в одну сторону, а после в другую. Так как такое заключение имеет значение для всей теории газов, то оно должно быть испытано точными способами. Впрочем в точности данных не только Румфорда и Наттерера, но даже и Реньо, есть повод сомневаться, потому что Реньо не принял во внимание ни влажности, которая могла остаться в испытанных им газах, ни сгущения на поверхности, которое в его опытах было велико, ибо они сделаны в узких трубках. Поэтому необходимы новые опыты для решения вопроса. Опыты с давлениями, меньшими, чем в 1 атмосферу, Менделеев уже начал вместе с М. Л. Кирпичевым, а опыты с значительными давлениями он предполагает сделать более далекими, чем у Реньо (до 30 атмосфер) при помощи сложного манометра, в коем столбы ртути перемежаются с водою, причем в комнате (для столба ртути вы-

сотою в 22 метра, как у Араго и Реньо) можно достичь точного измерения давлений, доходящих до 150 атмосфер (по способу Араго и Реньо потребовался бы ртутный столб в 114 метров). Для того же, чтобы придать определениям равномерную точность и при значительных сжатиях, Менделеев предполагает употребить весовой способ, который до сих пор при значительных давлениях еще не применялся. По этому способу газ, которого давление определяется сложным манометром, будет сжиматься в большом стальном сосуде определенного объема и затем будет взвешиваться. При этом необходимо и возможно определить и степень влажности газа и меру его сгущения на поверхности сосуда. Последнее достигнется при помощи изменения отношения между емкостью и сгущающею поверхностью сосуда.

Артиллерийский Журнал 1872 г., № 8.
Отдел неофициальный 901—976. [1]

О СЖИМАЕМОСТИ ГАЗОВ

I

К общим свойствам тел принадлежит сжимаемость их от давления, но мера ее для различных веществ весьма не одинакова. Для твердых и жидких тел она не велика и, повидимому, уменьшается с возрастанием давлений и увеличивается с приближением тела к его абсолютной температуре кипения.[2] При переходе от нулевого давления к бесконечно большому, объем тел этого рода мало изменяется. Судя по имеющимся данным, должно думать, что каждое твердое и жидкое тело, сжимаясь от давления или охлаждения, стремится к некоторому определенному предельному, малому объему, а при нагревании оно достигает, дойдя до абсолютной температуры кипения, своего предельного, наибольшего объема.

Поэтому изменения плотностей твердых и жидких тел ограничены довольно узкими пределами.

Совершенно иные свойства в этом отношении должно приписать газам при современном запасе знаний. Бойль и Мариотт в XVII столетии дали закон сжимаемости газов,[3] подвергавшийся с тех пор многократным испытаниям, говорившим то за, то против точной применимости этого закона. В резкой своей форме он дает повод думать, что при нулевом давлении объем газа будет неизмеримо велик, а при бесконечно большом давлении будет неизмеримо мал. В обоих случаях газ как бы исчезает. Изменения плотностей безграничны в обе стороны. Эти крайние следствия закона, хотя и не допускают опытной проверки, давно за-

---

[1] [Настоящая работа была кроме того напечатана в Журнале Русского Химического Общества, т. IV, вып. 8, стр. 169—194, 1872, со следующим примечанием после фамилии автора: «Сообщено в мартовском заседании Русского Химического Общества. Более подробная статья помещена в Артиллерийском журнале 1872 № 8». *Прим. ред.*]

[2] Абсолютною температурою кипения я называю такую температуру, при которой частицы жидкости вполне теряют свое сцепление (поднятие в капиллярной трубке = 0, скрытое тепло испарения = 0) и при которой жидкость, несмотря ни на какое давление и объем, вся превращается в пар. Для эфира эта температура близка к 180°, для хлористого кремния к 210°, для жидкой углекислоты 31°. См. об этом мои статьи в Химическом Журнале 1860 г. и в Poggendorff's Annalen 1871. B. 141—618. Связь сжимаемости с охлаждением и давлением особенно ясно видна в наблюдении Наттерера, показавшего, что жидкие CO^2 и N^2O сильно сжимаются от давления, а известно, что они значительно сокращаются и от охлаждения.

[3] Плотности газа возрастают пропорционально давлению. Историю закона этого можно найти в Gehler's Physikalisches Wörterbuch IV—1026 и в Regnault, Relation etc. I—329.

ставляли искать отступлений от закона. Главнейшими моментами в истории этого вопроса должно считать: во-первых, открытие способности газов превращаться в жидкости чрез сжатие давлением и охлаждением и, во-вторых, возможно точное измерение малых отступлений от закона во всех газах, сделанное Реньо, показавшим, что водород менее, а другие газы более сжимаются, чем следует по закону Мариотта. Из своих знаменитых *исследований* над сжимаемостью газов, *Реньо* сделал следующий *вывод*: ни один газ не следует закону Мариотта в точности, хотя сжимаемость всех газов, особенно при малой плотности (достигаемой нагреванием или разрежением), близко подходит к той, какую требует закон; водород при обыкновенной температуре менее сжимается, чем следует по закону, но вероятно при некотором значительном давлении и он будет сжиматься более, чем следует по закону, как то замечается над всеми другими газами, превращенными, или еще нет, в жидкость. Таким образом Реньо допускает, что при значительном давлении все газы сжимаются еще более, чем следует по закону Мариотта, и приписывает это тому, что газы тогда близятся к жидкому состоянию.[1] В настоящее время, с утверждением понятия об абсолютной температуре кипения, нельзя уже думать, что всякий газ, при каждой температуре, сильным давлением превратится в жидкость, а потому соображения Реньо не должны ныне иметь места. Но и помимо этого вышеизложенные заключения Реньо должно считать поспешными, по следующим причинам:

1) Реньо не определял погрешностей своих наблюдений над сжатием газов, а потому можно думать, что часть замеченных им отступлений от закона находится в пределе погрешностей. Подтверждением этому служит сличение отдельных наблюдений. Так, например, для воздуха (переводя все данные, где дана температура, к 5°) при переходе от давления, равного 1 атмосфере, к давлению в 2 атмосферы произведения из объема на давление (эти произведения по закону Мариотта должны быть постоянными) относятся между собою как:

1 : 0,9988, судя по данным I тома Relation стр. 347,
1 : 0,9998, „ „ „ II „ „ „ 235,
1 : 0,9979, „ „ „ II „ „ „ 248.

2) Реньо не исправил своих данных для высоты ртутного столба, определяющего давления, на изменение длины шкалы от теплоты, на вес сжатого столба воздуха, а поправка на температуру ртути (чрез нахождение среднего из нескольких термометров, висящих на разных высотах вне ртутного столба), введенная Реньо, недостаточно точна. Наблюдения над объемами газов у него не исправлены на остающуюся влагу, а судя по тому, что для сушения были употреблены трубки с пемзою, смоченною серною кислотою, и судя по тому, что газы должны были итти к насосу быстро, можно думать, что влага еще оставалась в газах.

[1] Relation des expériences etc. (Из Мемуаров парижской Академии) Т. I (1847), стр. 402, 414 и др.

3) Реньо сжимал газы в стеклянных трубках высотою в 2 метра и диаметром в 1 сантиметр, а потому имел большую сгущающую поверхность, а меры этого сгущения не определил (Relation, I—406). Достаточно предположить, что все газы, кроме водорода, сгущаются на поверхности стекла, а Киоцца, Магнус и др. даже измеряли величину такого сгущения, и если затем допустить увеличение сгущения с возрастанием давления, то этим можно объяснить замеченные отступления от закона Мариотта. При этом водород может составить исключение потому, что в нем заметны многие признаки металлов, а они стекла не смачивают. Такие предположения оправдываются моими, правда неполными и давними наблюдениями,[1] показавшими, что стекло, тщательно промытое и накаленное, по охлаждении в разных газах, столь же плохо смачивается водою, как и обыкновенное, а охлажденно в атмосфере водорода смачивается так же хорошо, как и то, которое охлаждено в безвоздушном пространстве.

4) Хотя число отдельных определений, сделанных Реньо и весьма велико, но вследствие отсутствия точной связи между отдельными определениями, нельзя вывести из данных точной меры отступлений от закона; сам Реньо пользовался для вывода немногими из своих данных и не воспользовался большинством своих чисел. Это будет очевидно, если указать способ наблюдения Реньо: он брал объем газа V под давлением P и сдавливал газ, увеличивая давление до P_1 и P_2 так, чтобы объем был приблизительно равен $^1/_2$ V и $^1/_3$ V. Затем в другом опыте мерился тот же объем V под новым давлением P′ и опять доводился до $^1/_2$ и $^1/_3$V. Если бы P′ было равно или близко к P_1 или P_2 предшествующих опытов, то можно было бы найти точную зависимость плотностей от давлений, но этого не было всегда соблюдено, а потому вывод о плотности газа будет заключать погрешность, гораздо бо́льшую, чем отдельное наблюдение. Так у Реньо для воздуха есть (в 1 т. стр. 374—379) 9 рядов, для которых средние давления в миллиметрах ртутного столба были:

P	739	2 112	2 069	4 142	4 219	6 770	6 390	9 334	11 474
P_1	1 476	4 210	4 127	8 178	8 406	13 474	12 729	18 547	21 056
P_2	—	6 850	—	—	12 928	19 202	19 400	—	—

Поэтому нельзя сделать суждения о плотности воздуха при давлениях от 1 476 до 2 069, а для давлений от 4 до 6 и 8 метров выходят данные, весьма между собою различные, смотря по тому, какой ряд возьмем для определений. Поэтому, хотя опыты Реньо и показывают ясно *качественную* сторону отступлений от Мариоттова закона, но не дают строгой возможности судить о *количественной* стороне вопроса.

5) Способ определения давлений, принятый Реньо, будучи сходен со способами Бойля, Мариотта, Араго и др., не допускает наблюдений

[1] Об этом я упоминаю в I т. «Основы химии» стр. 219. Считаю долгом упомянуть о том, что мое мнение о причине различия водорода от других газов (которые, я полагал, сгущаются на стекле и тем препятствуют смачиванию его) поколебалось, когда я сделал опыт с углекислотою, думая, что она будет растворяться и допустит смачивание, но его не было, а потому я не продолжал опытов.

при давлениях бо́льших, чем в 30 атмосфер, а между тем при высоких давлениях и сосредоточивается интерес, потому что уже прежние исследования показали, что при малых газы слабо отступают от закона. При давлениях выше 15 атмосфер данные Реньо не только содержат увеличенную погрешность, судя по способу наблюдения,[1] но еще и потому, что тогда пришлось определять высоты без других мерительных средств, как глаз и циркуль, ибо на бо́льшие высоты нельзя было поднимать катетометра.

Несмотря на указанную недостаточность данных Реньо, они все таки суть самые точные и полные из всех определений этого рода, а потому они заслуживают наибольшего доверия. Вывод Реньо об отступлениях всех газов от Мариоттова закона возбудил многие спекулятивные попытки примирить полученный результат с господствующим понятием о совершенном газе, точно следующем закону Мариотта. Отступления приписывают взаимнодействию (то притяжению, то ударам или сталкиванию) газовых частиц друг на друга. Понятие о совершенном газе, несмотря на исследования и замечания Реньо (I—402) еще сильнее, чем прежде, стало распространяться, хотя для утверждения его и не достает поныне исследований над плотностями газов под малыми давлениями. Тогда частицы газов так удалены, что взаимнодействие их должно уменьшаться и газ должен бы точнее следовать закону Мариотта.

Все вышеизложенное заставляет желать новых исследований над сжимаемостью газов, а если сделать обзор существующих сведений о плотностях сильно сжатых газов и принять во внимание соображения о соотношении между физическими свойствами тел и их составом, что я и сделаю вслед за сим, то необходимость в новых наблюдениях над плотностями газов при разных давлениях выступает с настойчивостью весьма живого научного вопроса, ибо от решения его зависят основные сведения о простейшем состоянии материи.

Ерстедт и Свендсен [2] испытывали до 70 атмосфер сжимаемость воздуха, причем держались лучшего способа для определения плотностей, а именно весового, но давления измеряли мало надежным способом, каким до сих пор и всегда определялись высокие давления, а именно определяли груз, поднимаемый при давлении на данную площадь, и пришли к тому заключению, что воздух, в пределе точности наблюдения, еще следует закону Бойля и Мариотта до 70 атмосфер.

Богатый материал для суждения о зависимости между давлением и плотностью газов доставляют *исследования над пороховыми газами*. Между ними первое место по точности и обширности, а также и по времени, занимают те, которые сделаны были еще в прошлом столетии известным английским физиком Румфордом в Мюнхене, при содействии

[1] Хотя Реньо и отрицает это. Большая погрешность в данных для высоких давлений заключается у Реньо потому, что к определениям плотностей при высоких давлениях возможно дойти только при посредстве предварительных наблюдений при меньших давлениях, а потому в них заключается сумма погрешностей определений, совершенных при низших давлениях.

[2] Oerstedt and Swendsen, Edinburgh Journal of Science VIII—224. Gehler's Physikalisches Wörterbuch 1828. T. 4, p. 1040.

баварских офицеров.[1] Наблюдения эти произведены в особой вертикально поставленной мортирке с отверстием в 0,3167 кв. сант. Это отверстие плотно запиралось кожаною пробкою, на которую накладывался груз (выраженный в английских фунтах, коих вес таков, что 0,95 фунта отвечает давлению 1 метра ртути на поверхности пробки), а по нему определялось давление. Зарядив мортирку известным количеством пороха и нагрузив грузом пробку, производили взрыв (чрез накаливание особой замкнутой нижней части мортирки) и наблюдали, что делается с грузом. Если он не шевелился, значит давление, развиваемое порохом, меньше положенного груза, тогда его убавляли, вновь клали тот же заряд и доходили до такого груза, при коем груз только-что шевелился. Веса пороха, при равенстве[2] емкости мортирки, будут пропорциональны [3] плотности пороховых газов. Эти веса менялись от 1 до 16 гранов, причем нагрузка изменялась от 57 до 5220 фунтов. Если бы пороховые газы следовали Мариоттову закону, то нагрузка должна была бы возрастать пропорционально плотности газа или весу пороха, а между тем отношения суть:

Плотности пороховых газов = весу пороха в гранах $= d =$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Давления в метрах ртутного столба $= p =$	60,	192,	228,	296,	484,	531,	628,	900,	1119,	1457
$d =$	11	12	13	14	15	16				
$p =$	1 716,	1 994,	2 551,	3 108,	3 662,	5 497.				

Следовательно, когда плотность увеличилась в n раз, давление увеличилось более чем в n раз, например, когда плотность из 8 стала 16, то-есть, возросла в два раза, давление увеличилось в 6 раз, а потому закон Мариотта здесь не применим.[4]

Взятые сами по себе эти опыты мало надежны, ибо дело идет о смеси паров и газов, имеющей вероятно и разные температуры, но при сопоставлении этих данных с другими и принимая во внимание те громадные давления, каких можно достичь этим способом, нельзя отказать и им в некотором значении, тем более, что, допуская закон Мариотта,

[1] Philos. Transactions 1797, P. II—221. Извлечения помещены во многих физических и военных журналах и в специальных сочинениях. Напр. в Русском Артиллерийском Журнале 1810 г. IV, 50 и V, 54. Piobert. Traité d'artillerie 1859—337 etc.

[2] Этого равенства впрочем в действительности не было потому, что емкость мортирки при разных давлениях и температурах была неодинакова, кожаная пробка сжималась, стенки со временем расширялись (можно судить об изменении формы уже по тому, что мортирку при заряде, большем 16 гранов, разорвало) и т. д.

[3] Строго говоря этого допустить также нельзя не только потому, что температуры газов при разных количествах пороха различны, но и потому еще, что ныне уже несомненна изменчивость состава порохового остатка и газов, смотря по давлению, при котором горит порох, как то ясно доказано Н. П. Федоровым (Артиллерийский Журнал).

[4] Румфорд и Пиобер старались выразить зависимость p от d показательною функциею, но и она плохо удовлетворяет всей совокупности данных.

невозможно объяснить громадных отступлений, здесь замечаемых, и еще потому, что при давлениях малых (до 600 метров) и здесь оказывается закон Мариотта близким к действительности,[1] а этого бы не было, если бы в опытах заключались очень грубые неточности.

Из других опытов над отношением плотностей и давлений пороховых газов должно обратить внимание на американские опыты Родмана,[2] но они менее обширны и еще менее точны, чем опыты Румфорда. Так, Родман определял давления особым, ныне часто в артиллерии применяемым, прибором (Родмана), состоящим из стальной призмы, на вершине которой находятся площадки тупой и длинной ромбической пирамиды. Ее вершина упирается в медную доску и при взрыве вдавливается в нее. По длине полученного углубления судят о давлении, потому что предварительными опытами можно установить отношение между длиною углубления и давлением, производимым на призму. Данные Родмана (в бомбе) близки к добытым Румфордом, особенно если принять во внимание, как это указал А. В. Гадолин, разность состава пороха обоих исследователей.

$d =$	700,	1 000,	1 400,	2 000,	2 333,	2 800,	3 500,	4 667, 7 000
$p =$	55,	87,	130,	223,	354,	419,	451,	691, 1 962

Значение опытов с пороховыми газами, при всей их очевидно малой точности, значительно возрастает при *сличении* их *с данными* австрийского ученого *Наттерера*, известного своими приборами для получения газов в жидком виде. Наттерер, занимаясь вопросом о превращении газов в жидкое состояние, пробовал, хотя и напрасно, сгустить в жидкости воздух, азот, кислород, водород, окись углерода и светильный газ, до сих пор не сгущенные в жидкость. При этом он заметил уже, что объем сдавленного газа не соответствует закону Мариотта и, желая это проверить, устроил,[3] при содействии Редтенбахера в Венской Академии Наук, новый прибор для сдавливания газов. Он состоял из стального ствола диаметром снаружи в 79 мм., внутри около 16 мм., длиною 47 сант., емкостью около 60 кубических сантиметров. К одному концу его был приделан винтовой кран, служащий для выпуска сжатого газа, а к другому клапан и цилиндр с поршнем, движимым винтом и сдавливающим газ, уже предварительно сжатый, раз во 100. Затем Наттерер,[4] сгустив сколько было возможно данный газ, определял его упругость при помощи груза, давящего на систему сложных рычагов, давящих в свою очередь на цилиндр, герметически приточенный к особому отверстию сосуда, в котором сдавлен газ, при чем принято было во внимание трение. Зная размеры плеч рычагов, вес груза, меру тре-

[1] В самом деле для малых давлений данные Румфорда близко выражаются формулою, требуемою законом Мариотта, а именно $\frac{d}{p} = \frac{1}{85}$. Вычисленная плотность мало отличается от наблюденной.

[2] Данные для опытов Родмана сообщены мне М. Л. Кирпичевым, которому я обязан и многими другими сведениями по вопросам, относящимся к этой статье.

[3] Sitzungsberichte d. Math.-Naturw. Klasse d. Kaiserl. Akademie der Wissenschaften, Wien. 1851 T. VI—557.

[4] Ibid., 1854 T. XII—199.

ния и площадь, на которую газ давит, Наттерер определия давление газа в атмосферах. Тогда он выпускал газ в мерительный цилиндр в количестве 10 объемов сосуда, вновь определял давление оставшегося газа, вновь выпускал 10 объемов (измеренных при обыкновенном давлении и температуре, но они не даны) и т. д., пока упругость оставшегося газа не была равна атмосферной. Складывая объемы выпущенного газа, Наттерер получал число объемов, соответствующее данному давлению и помещающееся при нем в сосуде. Давления переведены мною к высотам в метрах ртутного столба при 0° и чрез интерполирование найдены числа прилагаемой таблицы, выражающей совокупность результатов опытов Наттерера.

Давление в метрах ртутного столба при 0°	Число объемов газа, смеренного при атмосферном давлении и заключающегося в одном объеме при указанном давлении				
	Воздуха	Азота	Кислорода	Водорода	Окиси углерода
100	128	127	132	126	131
200	244	243	254	229	250
300	343	331	368	329	358
400	405	389	451	410	421
500	451	434	503	484	466
600	485	472	544	544	501
700	512[1]	503	577	595	529
800	537	528	606	641	554
900	561	549	631	685	575
1 000	582	567	652	725	594
1 100	600	584	—	762	611
1 200	617	599	—	797	626
1 300	632	612	—	830	641
1 400	646	625	—	863	655
1 500	659	638	—	894	667
1 600	671	650	—	919	678
1 700	682	662	—	942	689
1 800	693	672	—	961	699
1 900	704	683	—	977	709
2 000	714	693[3]	—	992	717
2 100	724	703	—	1 006	725
2 736[2]	800	710	—	1 040	730

Данные Наттерера приводят к тому же самому выводу, как и опыты Румфорда, показывая, что давления возрастают гораздо быстрее, чем

[1] Если бы опыты Наттерера были точнее, то, судя по числам, полученным для азота и кислорода, для воздуха должно было бы получить при давлении 700 метров 518 объемов, а получилось 512. Следовательно, в числах Наттерера наверное уже есть некоторая и немалая $\left(\text{по крайней мере } \frac{1}{100}\right)$ погрешность.

[2] Данные до 2 100 метров давления взяты из мемуара Наттерера 1854 года, а относящиеся к давлению в 2 736 метров ртути = 3 600 атмосфер, из его мемуара 1851 года.

[3] [В подлиннике опечатка: 603. *Прим. ред.*].

плотности, и при том для разных газов неодинаково.[1] Так как в отчете Наттерера не приведены ни точные способы очищения (особенно сушения) газов, ни способы измерения объемов, не дано температур, нет доказательств на то, что газ не терялся при его выпускании и т. п., словом, так как в его определениях не видно признаков точности, то данным Наттерера нельзя доверять в подробностях. Можно было бы даже сомневаться и в справедливости главного вывода опытов, если бы этот вывод не согласовался с развитыми далее соображениями и с результатами, добытыми над пороховыми газами. Чтобы сделать сличение обоих родов наблюдения, изойдем из тех плотностей, какие имеют газы при давлении в 100 метров ртутного столба и найдем, приняв плотность при этом давлении равной 100, какую плотность имеют газы при высших давлениях. Графический способ интерполирования дал следующий результат:

Плотности газов (d)	При давлении ртутного столба в метрах								
	p=100	200	400	600	900	1 200	1 500	1 800	2 100
Пороховые газы[2] по Румфорду .	d=100	191	344	461	567	641	721	794	861
Воздух по Наттереру	d=100	190	315	377	437	481	513	540	564
Водород	d=100	182	325	440	544	633	710	763	800
Окись углерода .	d=100	191	321	382	439	478	509	534	553
Пороховые газы по Родману . .	d=100	166	241	360	—	—	—	599	—

Из этой таблицы очевидно, что не только смысл отступлений от Мариоттова закона, но даже и мера этого отступления по опытам, столь различным, как опыты с пороховыми газами и опыты Наттерера (особенно для водорода), выходят близкими друг к другу, если принять во внимание погрешности, несомненно свойственные обоим наблюдениям. Близость чисел заставляет обратить внимание на указанные наблюдения. Будучи взяты в отдельности, они не получили права гражданства в физике, конечно, по их недостаточной точности, а совокупность этих опытов дает повод думать, что есть какой то общий закон для изменения плотностей газов с давлением и при том совершенно иной, чем Мариоттов закон, ибо пороховые газы имеют иной состав, чем газы Наттерера, и температуры газов в обоих родах наблюдений весьма различны, а закон изменения плотностей повидимому один и тот же. В настоящее время однако было бы напрасно пытаться утвердить существование такого закона, так как все имеющиеся до сих пор данные содержат грубые погрешности.

Все это дает однако новое побуждение заняться подробнейшим исследованием представляющегося вопроса, о чем я и говорю во 2 половине этой статьи. Но прежде, чем перейти к ней, я изложу те спекулятивные

---

[1] Это последнее обстоятельство выражено слабо и может быть зависит только от различного отношения газов к сосудам или от неточности наблюдения.

[2] При этом принят, судя по интерполированию, вес пороха, дающего в мортире Румфорда давление 100 метров ртутного столба = 1,405 гран.

соображения, которые оправдывают существование отступлений, видимых в опытах Румфорда и Наттерера, и служат противовесом тем соображениям, которые ныне наиболее распространены и приведены были выше, а потом постараюсь свести в одно целое запас данных, добытых наблюдениями Реньо и Наттерера.

Судя по закону Бойля и Мариотта, плотность газа возрастает пропорционально давлению.

Реньо и за ним многие другие думают, что газ, не сгущенный в жидкость, будет при значительных давлениях уплотняться еще более, чем следует по закону Мариотта, но то, что известно нам о свойствах газов (O^2, N^2, H^2, CO, CH^4, NO), не сгущенных в жидкость, заставляет думать, что при высоких давлениях они будут сжиматься менее, чем следует по указанному закону. Если бы, не превращаясь в жидкость, они продолжали бы следовать этому закону, или если бы уплотнялись более, чем он указывает, то их плотность при высоких давлениях достигла бы и превзошла бы плотность жидких и твердых тел. Так, например, под давлением одного метра ртути литр кислорода весит около 2 граммов, следовательно по Мариоттову закону при 500 метрах давления плотность сжатого кислорода достигла бы плотности воды, а при 7000 метрах давления — плотность сжатого кислорода превзошла бы и плотность ртути. Но такой плотности не сгущенные в жидкость газы достичь конечно не могут, потому что: 1) они все имеют малый атомный и частичный вес, например для кислорода атомный вес = 16, частичный 32, а тела значительной плотности встречаются только между такими, которых элементы обладают большим атомным весом, например, для ртути 200, золота 197, свинца 207, урана 240[1] и их соединений и т. п. 2) Химические (соединение, растворение) и другие молекулярные процессы сближают атомы тел такими сильными давлениями, каких мы едва ли можем достичь механическими способами, чему доказательство видим, например, в том, что газы, не сгущаемые в жидкость механически, легко дают жидкие и твердые соединения, а между тем, исследуя эти последние, находим, что и при сжатии в жидкость плотность таких соединений не велика. Так, например, азотная кислота HNO^3 есть жидкость, составленная из трех не сгущаемых газов, и имеет плотность около 1,5, которая не высока. Только для легких простых тел соединения их с кислородом тяжелее самых простых тел. 3) Приняв в соображение указанную мною зависимость свойств элементов от их атомного веса,[2] должно думать, что если бы кислород и азот были сгущены в жидкость, то они представляли бы объем атома, бо́льший, чем для углерода, и меньший, чем для натрия, от 8 до 14. Судя по этому, их удельный вес в жидком состоянии был бы не более 1,8 — 1,3, а если бы, оставаясь газом, эти вещества достигали большей плотности, то мы бы имели невероятный случай образования паров, более тяжелых, чем жидкость, из коей происходит пар. 4) Таких изменений в плотности,

[1] См. мою статью о законе периодичности Журнал Русского Химического Общества 1871 и Liebig's Annalen. Supplementband 1871, VIII.

[2] См. предшествующую цитату, труды 2-го Съезда Естествоиспытателей и Berlin. Berichte 1871, 348.

какие достигаются изменением давлений, можно достигнуть и изменяя температуру,[1] а сжатие (коэффициент расширения) при охлаждении, как известно, уменьшается для всех хорошо исследованных тел, особенно жидких, а потому при сильнейшем охлаждении они не дойдут до нулевого объема, а потому невероятно допустить это и для газов; следовательно и при механическом сдавливании должен быть предельный объем, которого тело не превзойдет или, говоря реальнее, как коэффициент сжатия от охлаждения уменьшается, так и сжатие от давления должно уменьшаться при усиливающемся давлении. Только при таком представлении не сгущаемые в жидкость газы не составят парадоксального исключения из всех других тел, для которых должно допустить предел сближения частиц, как охлаждением, так и давлением.

Эти спекулятивные соображения не позволяют допустить мысль о возможности безграничного уплотнения газов, не превращающихся в жидкость, а потому сжатие газов, идущее сперва по закону Мариотта, при некотором давлении должно уменьшаться и, следовательно, все газы этого рода *должны* при некотором значительном давлении *сжиматься менее, чем следует по Мариоттову закону*,[2] как то и воспроизводится в упомянутых опытах Румфорда и Наттерера. И так, хотя при малых давлениях газы и близко следуют закону Мариотта, но есть повод думать, что они будут сгущаться менее, чем следует по этому закону при некотором высоком давлении, если не превратятся в жидкость, как и тогда, когда превратятся в нее, хотя бы при некотором малом сдавливании газы и уплотнялись значительнее, чем следует по закону Мариотта. Следовательно, если возьмем такой газ, как воздух, и сочтем для него справедливыми данные Реньо и Наттерера, то получим следующую зависимость между плотностью и давлением. Исходя от атмосферного давления и идя выше, сперва ординаты кривой, выражающей зависимость плотности от давления $d = F(p)$, будут быстро возрастать и при том почти пропорционально давлению, следовательно касательная к ней будет проходить почти через начало координат. Если бы газ следовал точно закону Мариотта, то получилась бы прямая, проходящая чрез начало координат, но так как для воздуха, судя по Реньо, сжатие больше, чем следует по закону Мариотта, то касательная к кривой будет образовать с осью абсцисс (по коей отложены давления) угол, бо́льший, чем прямая, отвечающая Мариоттову закону, и станет пересекать ось абсцисс в ее положительной ветви. По мере возрастания давлений этот угол, судя по данным Реньо, уменьшается, а судя по данным Наттерера при высоких давлениях, касательная к кривой образует угол с абсциссою, меньший, чем прямая, отвечающая закону Мариотта, и приближается к некоторой предельной прямой (асимптоте).

---

[1] Явления теплотные суть своего рода изменения давлений, как это можно развить над всею совокупностью известных ныне фактов, что я полагаю сделать в другом сообщении.

[2] Этот предположительный вывод прямо противоречит выводу Реньо (Relation I—414), который считает, что даже и водород, при некотором большом давлении, станет сжиматься более, чем следует по закону Мариотта.

пересекающей ось абсцисс в ее отрицательной части и ординатную ось в положительной части. [1] Поэтому должно быть место перегиба кривой, где касательная проходит чрез начало координат и при соответственном давлении воздух следует закону Мариотта. Чтобы найти это место кривой, исследуем не прямо зависимость плотности d от давления p, а ту функцию, которую представляет частное из плотности на давление, т. е. найдем $\frac{d}{p} = f(p)$. Если бы воздух следовал закону Мариотта, то $\frac{d}{p}$ было бы постоянною величиною, то-есть функция выражалась бы прямою, параллельною оси абсцисс. Если сжатие больше, чем по Мариоттову закону (случай малых давлений, наблюдения Реньо), то $f(p)$ будет восходящею кривою, если же сжатие воздуха меньше, чем следует по закону (т. е. плотность увеличивается медленнее, чем возрастают давления, — случай больших давлений, наблюдения Наттерера), то кривая $\frac{d}{p} = f(p)$ будет нисходящею, а то место, где восходящая кривая переходит в нисходящую — есть искомая точка, она отвечает тому давлению, при коем воздух следует закону Мариотта, и есть наибольшее значение ординат кривой, отвечающей $\frac{d}{p} = f(p)$. Такое место кривой очевидно лежит за теми пределами давлений, до которых дошел Реньо, но не далеко, а потому возьмем только немногие из данных Наттерера. Не привожу всех деталей расчета, а сообщу здесь только сущность приема, употребленного мною.

Данные Реньо для сжимаемости воздуха перечислены мною для одной температуры 5°, пользуясь коэффициентами расширения того же наблюдателя, затем, под давлением 0,76 метров, вес литра воздуха принят за 1,2699 при 5°, а потому при $p = 0{,}76$ значение $\frac{d}{p} = 1{,}6709$ и вот численный результат частных интерполирований, произведенных по способу наименьших квадратов по опытам Реньо для воздуха.

Давление в метрах ртутного столба при 0°	$p = 1$	2	4	8	13	19	20
Вес одного литра воздуха в граммах .	$d = 1{,}6715$	3,3484	6,7144	13,473	21,97	32,24	33,955
Значение функции по данным Реньо . .	$1\,000\frac{d}{p} = 1671{,}5$	1674,2	1678,6	1684,1	1690,0	1696,8	1698

[1] Вся совокупность данных Реньо и Наттерера показывает, что зависимость $d = F(p)$ близка к гиперболической. Одною асимптотою для этой гиперболы служит прямая, отвечающая закону Мариотта (но для ее определения не достает данных при давлениях, меньших атмосферного), а другою та прямая, которая почти выразит сжимаемость газа при очень высоких давлениях. Попытки определить эту гиперболу, по данным Реньо и Наттерера, были выражены мною графически и довольно близко отвечали наблюдениям, но так как в точности данных Наттерера даже Реньо есть повод сомневаться, то я и не привожу результатов сделанных мною расчетов, однако думаю, что гиперболическая кривая может лучше всякой другой кривой 2-го порядка отвечать закону изменения плотности с давлением.

Исходя из того, что $\frac{d}{p}$ 1 000 при давлении 1 атмосферы = 1670,9, и пользуясь таблицами Наттерера, я вычислил затем следующие данные:

Давление в метрах ртутного столба при 0° . . . . . $p =$	80	100	200	400	1000	2000
Вес литра воздуха при 5° под давлением p, в граммах по Наттереру: . . . . . $d =$	132,56	163,08	311,5	514,7	739,6	906,8
Значение функции. $\frac{d}{p}$ 1 000 =	1657	1631	1557	1287	740	453

Из этих данных очевидно, что значение $\frac{d}{p}$ у Реньо возрастает, а у Наттерера уменьшается с возрастанием p, то-есть между 20 и 80 метрами давления лежит точка перегиба кривой. Чтобы найти ее, возьмем значения $\frac{d}{p}$ при 120 и 100 метров давления. Тогда найдем для давлений от 1 до 100 метров $f(p) = \frac{d}{p}\ 1000 = 1669{,}7 + 1{,}868\ p - 0{,}02255\ p^2$. Поэтому наибольшее значение функции соответствует давлению $p = \frac{1{,}868}{0{,}02255} = 41{,}4$ метра. Хотя формула эта удовлетворяет данным Реньо, но она мало применима к данным Наттерера. Взявши иные данные из Реньо и Наттерера найдем и другое положение точки перегиба кривой, но она все-таки должна существовать. *При давлении, отвечающем точке перегиба кривой* $\frac{d}{p}$, *газ следует закону Мариотта, при меньшем сжимается более, чем следует по закону, а при бо́льшем давлении — меньше, чем следует по закону.* Это заключение выводится, допуская справедливость чисел и Реньо и Наттерера, а так как, судя по предыдущему, есть повод сомневаться даже в точности чисел Реньо, то рождается необходимость подтвердить существование упомянутой точки перегиба другими прямыми опытами. Такое подтверждение находим в числах из недавних наблюдений Ендриуса[1] над углекислотою, хотя цель и направление опытов этого английского ученого и были совершенно иные, чем задача, занимающая нас. Ендриус нашел, что при температуре выше 31° углекислота никаким сдавливанием не превращается в жидкость. Для своих наблюдений Ендриус сжимал в двух узких калиброванных трубках единовременно: в одной воздух (это есть закрытый манометр, дающий давление), а в другой углекислый газ при разных температурах и замечал объемы. Берем один из его рядов, соответствующий температуре 32°,5 и, заметив, что литр углекислого газа при давлении 1 атмосферы при 32,5° весит 1,7653 гр., под давлением 1 метра весит 2,323 гр., найдем ту функцию $\frac{d}{p}$ 1000, какую находили и в предшествующем расчете.

[1] Philos. Trans. 1869, II. Pogg. Annalen, Ergänzungsband V (1870) p. 64. [Сохраняем, как и в других случаях, правописание Д. И. Менделеева, хотя Andrews ближе по-русски передать чрез «Эндрюс». *Прим. ред.*].

По данным Ендриуса		*Вычислено*		
Давление в атмосферах, судя по сжатию воздуха	Число объемов углекислого газа, заключающихся в одном объеме, при T=32,5°	Вес 1-го метра сжатого углекислого газа в граммах	Давление в метрах ртути при 0°,	Искомая функция
56,8	82,72	146,02	43,16	3 380
59,4	88,94	157,00	45,14	3 478
62,2	96,41	170,20	47,27	3 600
66,4	106,0	187,12	49,70	3 765
72,6	135,1	238,50	55,18	4 322
76,8	161,2	288,57 [1]	58,37	4 875
81,6	228,0	402,49	62,02	6 490
90,1	373,7	659,70	68,48	9 633
93,3	387,9	684,75	70,91	9 657
100,3	411,0	725,54	76,23	9 518
108,6	430,2	759,43	82,54	9 201

Из этого видно, что при давлении от 70,9 до 76,2 метров для углекислого газа функция $\frac{d}{p}$ достигает своего наибольшего значения и как ни парадоксален на первый взгляд этот вывод, при этом давлении углекислый газ следует закону Мариотта, при высших давлениях сжатие менее, а при низших более, чем следует по закону Мариотта. Поэтому в опытах Ендриуса находим подтверждение выведенного мною выше из опытов Реньо и Наттерера заключения о существовании некоторого высокого давления, при коем одном и справедлив закон Мариотта.

Если же закон Мариотта справедлив только при некотором значительном давлении, то все наши понятия о газах должны претерпеть значительное изменение, а потому и становится весьма желательным новый ряд опытов для проверки Мариоттова закона. Мне кажется особенно полезным направить исследование на следующие пункты:

1) Числа Реньо показывают уже уменьшение изменения функции $\frac{d}{p}$ с возрастанием давления,[2] а потому опыт должен показать существование такого давления, при коем $\frac{d}{p}$ достигает наибольшего значения, если будут взяты несгущаемые газы. Для этого, взявши воздух или составляющие его газы, или окись углерода и т. п., следует определить отступления от Мариоттова закона при давлениях в 70 или 80 атмосфер. Во второй части этой статьи я излагаю приемы, которыми предполагаю придать определениям этого рода надлежащую точность.

2) Если верен вывод из опытов Реньо о том, что функция $\frac{d}{p}$ возрастает все медленнее с повышением давления, то с понижением давления,

[1] [В подлиннике опечатки 56,4 и 248,57. *Прим. ред.*].

[2] Например на 1 метр прибавленного давления, значение для $\frac{d}{p}$ 1000 увеличивается для воздуха при $p = 2$ на 2,4, а при $p = 16$ только на 1,1; надо ждать, что изменение это, сделавшись при некотором давлении $= 0$, затем станет отрицательным.

должно думать, что эта функция для таких газов, как O^2, N^2, CO, CO^2 и т. п., будет вероятно изменяться все быстрее и быстрее, а потому весьма интересно проследить отступления от Мариоттова закона при давлениях малых, особенно меньших, чем атмосферное. Определения, сделанные Реньо, относятся к давлениям примерно в $^1/_2$ атмосферного давления, при том сделаны весовым способом,[1] который здесь наименее приличен для достижения точных чисел, ибо вес газа, при малых даленіях, очень мал. А между тем при малых давлениях, употребляя способ измерения объемов, легко можно делать еще очень точные наблюдения при разрежении, доходящем более, чем до $^1/_{1000}$ первоначального объема. Необходимо при этом, для определения малых давлений, употреблять манометры с серною кислотою или маслом. Если можно считать $^1/_{10}$ миллиметра за предел точного измерения манометрических высот, то $^1/_{10}$ миллиметра масла отвечает $^1/_{150}$ доли миллиметра ртути, потому что масло примерно в 15 раз легче ртути, а $^1/_{150}$ миллиметра ртути отвечает $^1/_{1141000}$ доли атмосферного давления. $^1/_{1000}$ доля атмосферного давления отвечает 0,76 миллиметра ртути или 11,4 миллиметрам высоты масляного манометра. Опыты этого рода уже начаты мною вместе с М. Л. Кирпичевым, но его болезнь и мои занятия по проектам, сообщаемым во 2 части этой статьи, заставили нас временно отложить начатые исследования.

3) Вопрос об отступлениях от Мариоттова закона становится особенно интересным по отношению к водороду, ибо Реньо показал, что этот газ сжимается от 1 до 30 атмосфер уже слабее, чем следует по закону, а именно так, судя по предыдущему, и должны сжиматься все газы, если они не переходят в жидкость.

Поэтому опытным путем для водорода должно решить: a) Будет ли газ этот и при малых давлениях отступать от Мариоттова закона в том же смысле, как и при давлениях от 2 до 20 метров? b) При повышении давления выше 20 метров станет ли продолжаться все время уменьшение сжимаемости? c) Не зависит ли различие результатов опытов Реньо для водорода от результатов, полученных для других газов, от различного их отношения к стеклу и ртути? d) Каковы будут отступления водорода при высших и низших температурах?

И так, существующие ныне опытные и спекулятивные сведения о сжимаемости газов нельзя считать достаточными для ответа на самые элементарные научные вопросы, относящиеся к этому делу, а потому для утверждения истинных понятий о сжимаемости газов, и, следовательно, и об их основных свойствах, необходимы новые исследования над сжимаемостью разных газов.

Интерес таких исследований, особенно по отношению к сильно сжатым газам, возрастает еще от того, что такие газы обладают значительною упругостью и составляют самый энергический источник для произведения движения. Артиллерия и горный промысел давно уже пользуются запасом силы жатых газов, развивающихся при горении взрывчатых веществ, а в настоящее время и в остальной технике все

[1] Relation etc. т. I—139.

чаще и чаще встречаются и возбуждаются применения, основанные на пользовании сильно сжатыми газами. Малое знание законов действия такого источника движения составляет одну из причин медленного прогресса в его применении, а с изучением этих законов вероятно область этих применений расширится. Особенно богатую будущность обещает применение сильно сжатых газов (напр., водорода, развиваемого действием цинка на серную кислоту), образующихся при химических процессах, так как этим путем могут быть удобно получаемы газы, обладающие весьма большою упругостью. Вопрос о двигателе, имеющем малый объем и вес, поднимавшийся по поводу вопроса о движении аэростатов, подводных судов и т. п., по моему мнению, разрешается проще всего применением сильно сжатых газов, особенно водорода.

Соображения эти, сообщенные мною председателю Русского технического общества, члену Химического и др. обществ, известному соревнователю наук, Петру Аркадиевичу Кочубею, обратили на себя его внимание, и он от лица Русского технического общества ходатайствовал о назначении средств для производства предположенных мною опытов у покровителя Русского технического общества, его императорского высочества, великого князя Константина Николаевича, который и принял горячее участие в этом научном вопросе. Благодаря затем вниманию г. г. Морского и Военного министров, ныне отпущены Русскому техническому обществу средства для исследования сжимаемости газов до 80 атмосфер. Потому из членов этого общества образована особая комиссия, рассматривающая предположенные проекты. Она составлена под председательством Инспектора арсеналов, профессора Михайловской артиллерийской академии и доктора физики А. В. Гадолина, из следующих лиц: Г. К. Брауэра, бывшего механика Пулковской обсерватории, взявшегося выполнить многие приборы, необходимые для исследования, преподавателя Технологического института В. Л. Кирпичева, преподавателя Артиллерийского училища М. Л. Кирпичева, профессора Инженерной академии и Технологического института Н. П. Петрова, профессора С. Петербургского университета Ф. Ф. Петрушевского, товарища председателя IV отдела Русского технического общества Л. П. Семячкина и меня. Содействие этих лиц, принявших на себя изучение некоторых отдельных вопросов, представляющихся или при самом исследовании или при его применении к специальным целям, дает уверенность в достижении желаемых результатов; но такой вопрос, как вопрос о сжимаемости газов особенно при высоких давлениях, подвергавшийся исследованию многих ученых, представляет такие значительные трудности, что я решаюсь, приступая к опытам, изложить соображения, при помощи которых предполагаю достичь желаемых точных результатов, потому что надеюсь после того получить и от лиц, не участвующих в комиссии, замечания и советы, которые помогут успеху предпринимаемого исследования. Излагаемые вслед за сим проекты уже рассматривались в комиссии и чертежи их выполнены, но я не считаю необходимым прилагать их здесь, потому что многие подробности при выполнении вероятно

изменятся, а зато я излагаю важнейшие соображения, руководившие мною при проектировании, так как от них зависит успех предприятия, по крайней мере на столько же, на сколько и от правильности в применении принятых начал от искусства исполнителей приборов и наблюдателей.

Прежде чем перейти к изложению проектов, считаю долгом выразить здесь мою искреннюю благодарность многим лицам, обратившим внимание на мои предположения и содействовавшим возможности их осуществления, а особенно П. А. Кочубею, А. В. Годолину и Л. П. Семячкину, помимо которых моим предположениям не предстояло бы возможности выполнения. Их участию, вниманию и содействию я уже многим обязан и они, вместе с другими членами комиссии, продолжают принимать горячее участие во всех, даже мелких, подробностях, касающихся выполнения предполагаемых исследований.

II

Цель предполагаемых опытов составляют возможно точные числа, выражающие зависимость изменения плотностей разных газов от давлений, под коими они находятся. Поэтому для достижения ее необходимо иметь: 1) точные средства для измерения давлений, как атмосферного, так и меньших и в особенности бо́льших, чем атмосферное; 2) средства для сжатия газов до значительных плотностей; 3) средства для сохранения сжатых газов, дабы можно было определить в таком газе и давление, и плотность; 4) точные средства для определения плотностей газов, т. е. их веса и объема. Успех исследования, точность результатов и возможность их повторения и поверки зависит не только от выбора этих средств, но также и от многих других причин: 5) от однородности и чистоты газов, 6) от постоянства и определения температур, 7) от точности мерительных приборов, 8) от определения влияния поверхности сосудов на плотность и от многих других. Эти последние причины однако имеют второстепенное влияние, не требуют новых специальных приемов, для них возможно пользоваться уже известными способами, применяя некоторые улучшения, сообразные делу, а потому я остановлюсь на них только вкратце, а главное внимание обращу на первые четыре средства исследования, так как от недостаточности их зависят преимущественно те недостатки в существующих исследованиях, какие мы видели в предшествующем исследовании. Это можно доказать исследованием над зависимостью величины погрешностей опытов и сжимаемости газов от погрешностей в отдельных частях наблюдения, но я не привожу его здесь, потому что и без того считаю очевидным преимущественное значение первых четырех средств, сравнительно с другими.

Прежде всего должно заметить, что для наблюдения над сжимаемостью газов под высокими давлениями необходимо предпочесть *весовой способ* объемному по многим причинам, а именно: 1) потому что объемные определения возможно производить с удобством и точностью только в больших стеклянных сосудах, а такие больших давлений не

выдерживают; 2) объемные определения все-таки в сущности сводятся на весовые, так как емкости определяются весами; 3) весовой способ удобоприложим к сильно сжатому газу, ибо тогда он имеет значительную плотность; 4) каждое отдельное наблюдение в весовом способе совершенно самостоятельно, не зависит от предшествующих определений, тогда как в объемном способе первое наблюдение объемов должно быть сделано при таком давлении, при котором плотность газа уже известна, а второе определение одно только и служит, как новое наблюдение, а потому, строго говоря, в каждом объемном определении есть двойная погрешность; 5) известно, что определение значительных объемов и при этом малых их долей менее точно, чем определение значительных грузов и малых их частей, хотя бы доли, наблюдаемые по объемам, и были меньше тех, какие наблюдаются по весу.

По этим причинам я предполагаю употребить объемный способ только при давлениях, меньших, чем 1—5 атмосфер, а все прочие определения сделать весовым способом. Притом я предпочитаю сделать *немногие, но точные и повторенные определения*, при нескольких значительно разнящихся давлениях, чтобы по возможности не прибегать к способу наименьших квадратов для извлечения окончательного результата. Умножение числа наблюдений при разнообразных давлениях, близких друг к другу, представляет не только многие затруднения для исследования, но и увеличивает погрешность вывода. Так, например, мне кажется совершенно достаточным определить плотности газов при давлениях, близких к 0,0001; 0,001; 0,1; 0,2; 0,5; 0,76 метров ртутного столба, затем при давлениях 3, 6, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 54, 60 метров, и если для каждого из этих давлений добыть три или четыре числа, погрешность коих по роду наблюдений сперва должна быть известна, то сравнивая эти наблюдения друг с другом, можно определить эмпирическую зависимость d от p при всех давлениях до 60 метров и определить *меру точности каждого наблюдения*, что я считаю чрезвычайно важным залогом верности результата. Недостаток знания степени точности наблюдений составляет главнейшую причину того, что из множества существующих ныне наблюдений над сжимаемостью газов нельзя еще вывести точных чисел, предел погрешности которых был бы известен.

Указав главнейшие соображения, руководившие меня в проектировании наблюдений, перейду теперь к описанию приборов.

Приборы для определения давлений. Здесь первое место принадлежит *барометру*, потому что исходным пунктом всех определений должно служить знание плотностей при атмосферном давлении. Если счесть 0,1 мм. за предел точности в наблюдении барометрических высот, то знание плотности воздуха при давлении 760 миллиметров будет точно только на 0,00016 г. на литр или, если взять сосуд в 15 литров погрешность будет 0,0024 грамма, а взвешивание можно сделать гораздо точнее. При том барометрические показания входят и во все определения высших и низших давлений, производимые при помощи открытых манометров, а известно, что согласие показаний барометров в пределе точности измерения высот ныне считается не достигнутым. Реньо приз-

нает [1] 0,1 мм. за предел точности определения барометрических высот, многие физики. геодезисты и астрономы допускают еще и бо́льшую погрешность.[2] Для устранения известных мне недостатков я предполагаю устроить свой барометр прежде всего с *трубчатою* железною *шкалою*, которую сличу с нормальным своим метром при некоторой температуре, до которой всегда могу довести свою шкалу, пропуская чрез трубку воду желаемой температуры. Предполагается кроме того определить и коэффициент расширения шкалы.

Чтобы соединить удобства чашечного и сифонного барометра, я думаю устроить чашечный, но с чашкою, герметически закрываемою крышкою (заливаемою мастикою) и при том так, чтобы чрез крышку чашки проходила сверх барометрической еще другая более короткая трубка, отвечающая сифонной.[3] Прибавляя и убавляя в ней ртути чрез особые боковые трубки (идущие от сифонной трубки), будем иметь возможность постоянно делать наблюдения при восходящем или нисходящем положении ртути, что сделает определения согласными, потому что содействует образованию мениска всегда, однообразного по форме, но высоту которого все-таки необходимо мерить. При этом железная шкала будет стоять в средине между стеклянными трубками и чрез это облегчится и сделается точным катетометрическое определение высот барометра. Чтобы измерять упругость воздуха, находящегося в пустоте, ее необходимо калибровать и, возвышая и понижая уровень в сифонной трубке, замечая при этом объем пустоты и высоту барометра, можно определить (Вильд) ту поправку, которую должно сделать на упругость оставшегося воздуха. Сверх того следует сделать поправку на упругость ртутных паров. Для полного достижения правильности в поправке на температуру ртути в барометре я предполагал сперва всю его часть над чашками окружить водяною ванною, но полагаю ныне, что будет

[1] Relation, etc. I—69.

[2] Главные причины малого согласия барометров между собою, сколько мне известно, суть: 1) Не обращают или мало обращают внимания на точное сличение шкал, на изменение их длины от температуры и т. п. 2) Употребляя барометры с чашкой, не исправляют на давление мениска в чашке; употребляя сифонный барометр, иногда считают давления менисков равными. 3) Не обращают надлежащего внимания и не измеряют иногда форму менисков, а от нее столько же зависит капиллярное давление, как и от радиуса трубки. 4) Для поправки на давление мениска пользуются ошибочными таблицами, о чем писали еще Pohl und Schabus в Sitzungsberichte d. Akademie in Wien 1852, IX—834. 5) Сведения о давлении мениска ртути вообще очень еще недостаточны. 6) При падении барометра верхний мениск иногда становится плоским и даже вогнутым, а потому следует все измерения производить при восходящем движении ртути, что легко достичь. 7) Не принимают во внимание давления воздуха и ртутных паров, находящихся в пустоте. 8) Температуру ртути барометра иногда определяют в таких условиях, таким термометром и так помещенным, что он не имеет температуры ртути в барометре. 9) Для поправки на температуру ртути иногда довольствуются заведомо недостаточно точными старыми коэффициентами расширения ртути. Слагаясь между собою, эти условия и делают барометрические наблюдения не согласными между собою часто до 5,0 и более миллиметра. При проектировании своего барометра я имел в виду все вышеуказанные условия.

[3] В недавнее время Г. Брауэр устроил для Главной метеорологической обсерватории, по идее г. Вильда, барометр с подобным этому устройством, но мало практичный уже по одной его дороговизне.

достаточно устроить из части барометрической трубки большой термометр с цилиндрическим резервуаром, который, помещаясь на средине высоты барометра, будет менять свою температуру так же, как и барометр. Устроив два или несколько таких барометров, сделавши особые предварительные наблюдения над отношением высоты мениска к его давлению, я получу возможность узнать степень точности своих барометрических отчетов и надеюсь достичь до точности, бо́льшей, чем та, какую Реньо считал за предельную.

На этих началах и проектирован мною барометр, которого дальнейшие детали без рисунка не могут быть ясно описаны, а потому перехожу к другому, важнейшему прибору, необходимому для исследований, а именно к *манометру для высоких давлений*. Если бы я не ожидал преодолеть встречающиеся здесь трудности новыми способами, допускающими точность и удобство, то конечно не стал бы и проектировать всю совокупность предлагаемых опытов. Трудность здесь зависит от того, что другого точного способа измерения давлений, кроме прямого измерения высоты ртутного столба, еще нет, а прямой ртутный столб, какой употребляли до сих пор все исследователи, начиная с Бойля до Реньо, при значительных высотах, представляет разные причины для неточности в измерении, и множество неудобств напр. неудобства соблюдения равных температур, необходимость перемещения наблюдателя и приборов на разные высоты и т. п. Реньо, употреблявший ртутный столб высотою в 22 метра, едва ли не достиг уже возможного предела, при котором однако уже вкрались погрешности от того, что наблюдения в верхних частях пришлось делать без пособия катетометра, а циркулем и на глаз. Для определений, доходящих до 80 атмосфер, пришлось бы иметь столб ртути в 61 метр, а потому нужно было бы возводить особые постройки и все-таки в точности результатов можно было бы сомневаться. Применяя давно известный, когда то употреблявшийся в технике открытый, но *сложный манометр*, где столбы ртути перемежаются со столбами воды, я думаю иметь удобное средство достигнуть точного определения разнообразных давлений, не переменяя места катетометра, и доходить до таких давлений, которые только могут выдерживать стеклянные трубки, если приспособить такой манометр к точным наблюдениям. Чтобы показать значение предлагаемой мною системы определения высоких давлений, я опишу в кратких чертах тот экземпляр манометра, которого проектирование теперь уже кончено, и затем укажу способы, какими предполагаю итти далее. Предполагаемый манометр назначен для прямых определений давлений, доходящих до 80 атмосфер, т. е. соответствует прямому манометру высотою в 61 метр, а имеет высоту только около $3^1/_2$ метров. Он состоит из 40 вертикальных стеклянных трубок этой длины,[1] последовательно

[1] Трубки предполагаются длиною каждая около $1^1/_2$ метров, следовательно каждая трубка составится из трех, скрепляемых между собою стальными охватами, залитыми мастикою. Лучшею мастикою для этой цели, по своим опытам, произведенным до сих пор, я считаю следующую: 35 частей парафина, 40 частей мастикса, 30 частей канифоли и 50 частей просеянной толченой пемзы. К ней прибавляется по требованию от 3 до 6 частей канадского бальзама и от 3 до 5 частей льняного

соединенных между собою в верхних и нижних частях. Трубка № 1 идет к насосу, доставляющему сгущенный газ, и к сосуду, его содержащему. В ней находится небольшое количество ртути. Нижний конец трубки залит мастикою в соответственном отверстии нижнего стального бруса манометра. В этом брусе находится горизонтальное отверстие, идущее поперек бруса и сообщающее трубку № 1 с трубкою № 2. Трубка № 2 наполнена ртутью, а верхняя часть водою. Эта часть закреплена в верхний стальной брус манометра и сообщается косым, проделанным в брус, горизонтальным каналом с трубкою № 3, которая стоит рядом с трубкою № 1. В трубке № 3 вся верхняя часть занята водою, а внизу находится ртуть, она сообщается особым поперечным горизонтальным каналом нижнего бруса с трубкою № 4, которая стоит рядом с трубкою № 2 и, как эта, наполнена почти до верху ртутью. Так идут далее и все трубки до трубки № 40, которая вверху открыта и содержит ртуть.

И так, получаются два ряда трубок, в каждом ряде по 20 трубок. В нечетных трубках ртутный мениск находится внизу и все трубки наполнены водою, а в четных трубках, видных с другой стороны манометра, ртутный мениск находится вверху. Все остальное пространство занято водою. Если весь манометр будет в деле, то им можно мерить давление, равное 20 высотам ртутных столбов длиною около 3,3 метра или 66 метров ртути, но так как в 19 трубках столбы воды такой же высоты действуют в обратную сторону, то из высоты 66 метров надо вычесть высоту ртутного столба, отвечающего водяному столбу высотою в $19 \cdot 3{,}3$ или в 62,7 метра. А так как ртуть в 13,5 раз (здесь взято приближенное число, конечно в действительности будет взято точное число) тяжелее воды, то давление 62,7 метров воды отвечает давлению 4,6 метров ртути, а потому весь прибор дает возможность мерить давление $= 66 - 4{,}6 = 61{,}4$ метра ртути. Чтобы возможно было применять манометр, трубки должны выдерживать столь значительные давления, а судя по наблюдениям Шевандье и Вертгейма,[1] определившим, что предельное давление хорошо закаленного стекла более 1 кило на квадратный миллиметр, можно расчесть, что трубки диаметром внутри 6, а снаружи 12 миллиметров выдержат такое давление. Более толстостенные трубки не только трудно изготовлять одинакового диаметра и равномерной толщины, но и трудно закаливать, а потому со стеклянными трубками я считаю безопасным и удобным делать определения не более как до 100 атмосфер давления. При диаметре отверстия в 6 миллиметров легко определить высоту мениска и сделать поправки, необходимые для точности результата, о чем здесь я не стану распространяться. В верхнем и нижнем брусьях манометра сделаны приспособления, понятные без дальнейшего описания, допускающие возможность приливать и отли-

---

масла, если желательно придать мастике некоторую мягкость и при обыкновенной температуре. Мастика эта хорошо пристает к нагретому стеклу и металлу, жидка в расплавленном виде, легкоплавка, застыва, вязка и тягуча, а при обыкновенной температуре тверда и менее хрупка, чем обыкновенная мастика. Изучение мастик с подробностью было бы очень важно для устройства многих физических приборов.

[1] Annales de Chimie et de Physique 1847 (5) XIX—129.

вать ртуть и воду в каждую трубку, а потому есть возможность взять такие количества этих жидкостей, чтобы все верхние мениски ртути стояли приблизительно на одной высоте, а также и все нижние мениски ртути. Такое равенство высот менисков значительно облегчает измерения высот каждого столба ртути и представляет возможность придать этим измерениям желаемую точность. Для этой цели около трубок помещается вертикальная железная труба, длиною в $3^1/_2$ метра, закрепленная только внизу или в средине, чтобы могла свободно расширяться. На этой трубе, могущей вращаться на центральных подшипниках, сделается несколько круговых платиновых поясов, а на них круговые тонкие реперные черты. Крайние (верхний и нижний) пояса будут на таком примерном расстоянии, какое будет между верхними и нижними менисками. Пред опытами, пропуская чрез трубку воду определенной температуры, определится, по отношению к нормальному метру, расстояние реперных черт, а во время опыта катетометром, стоящим с одной стороны манометра, на которой нечетные трубки, определится расстояние от уровней нижних менисков ртути до нижней реперной черты железной трубы, а другим катетометром, стоящим вверху и обращенным к четным трубкам манометра, определится расстояние верхних менисков от верхней реперной черты железной трубки. Таким образом, *катетометром будут измеряться только малые доли* всей высоты ртутного столба, а *большая часть высоты* столба ртути *найдется, умножая число столбов ртути* на точно определенное и сохраняющееся *расстояние реперных черт постоянной железной трубки*. Этим путем лучше, чем каким-либо другим, можно достичь точного измерения больших столбов ртути.

Притом и малые разности определятся *катетометрами неподвижными*, а потому допускающими точную установку. Что касается до катетометров, то их готовит для моих исследований г. Брауэр, а его катетометры должны быть считаемы за лучшие из известных. Так в изготовляемых катетометрах нониус будет давать $^1/_{200}$ миллиметра, в трубках есть окулярные микрометры, дающие возможность измерять еще точнее малые высоты (например, в наших опытах высоты менисков, расстояния от реперов и т. п.), уровни труб будут чувствительны до 2″ (секунд), а потому при расстоянии от катетометра до манометра $= 1^1/_2$ метрам, можно будет с уверенностью читать $^1/_{100}$ миллиметра. Предполагая погрешность на каждый столб ртути, достигающею даже до $^1/_{10}$ миллиметра, при 20 столбах ртути получим погрешность $= 2$ миллиметрам на 60 метров всей длины, что составит погрешность не более $^1/_{30000}$, чего нельзя и думать достичь при измерении прямого столь длинного вертикального столба ртути. Притом, относительная погрешность в определении высоты столба ртути не будет здесь возрастать с длиною, а точность определений будет оставаться постоянной при больших и малых высотах. Результат измерений будет исправлен на температуру ртути и воды, на сжатие их от сдавления, на разность давлений менисков, на давление атмосферы (действующее на открытый конец) и т. п., но это не требует дальнейшего обсуждения, а я считаю необходимым объяснить, как будет служить мой манометр для определения

давлений, меньших, чем в 60 метров ртути, и для бóльших, чем это, давлений.

Необходимо заметить, что с манометром, проектированным мною, возможно ждать точных чисел только тогда, когда столбы ртути и воды, раз установленные на надлежащую высоту, не станут затем значительно перемещать своего места, потому что иначе к ртути подмешается вода.

Чтобы достичь этого, сообщение между трубками № 1 и № 2, после окончания определения давления, запрется особым винтом, находящимся в нижнем стальном брусе манометра, а потому, если на ртуть в трубке № 1 и станет теперь действовать одно атмосферное давление, все-таки все столбы ртути сохранят свое первоначальное положение. Подобным же путем можно оторвать и некоторую часть манометра и тогда, пользуясь одною частью манометра, определять меньшие давления, чем в 60 метров ртути. Представим себе, что мы закрыли особым винтом, находящимся в нижней доске манометра (а таких винтов в предполагаемом манометре 12) сообщение между 5 и 6 трубками и при том открыли сообщение верхнего конца 4 трубки с атмосферою. Тогда [1] у нас в распоряжении будет манометр, содержащий 2 столба ртути (в трубках № 2 и 4) и один столб воды (в № 3), а потому таким манометром определится давление, равное $2 \cdot 3{,}3 - \frac{13{,}5}{3{,}3}$ или около 6,3 метра ртутного столба, не перемещая столбов ртути, а сохраняя для них те же высоты. А чтобы достичь малой изменяемости положения столбов ртути и воды и тогда, когда накачивается воздух, сообщение между трубками № 1 и № 2 открывается лишь в то время, когда приблизительно уже достигнется желаемое давление, для чего необходимо иметь особый *манометр, дающий приблизительные показания*. Таким манометром может служить: 1) обыкновенный бурдоновский манометр, но он представляет то неудобство, что расходует много газа, 2) открытый ртутный манометр (пиезометр) окруженный ртутью и помещенный в трубку, проводящую сжатый газ к манометру; 3) удобнее же всего приблизительному манометру придать форму стальной пластинки, на которую с одной стороны будет действовать сдавленный газ, который станет ее выпучивать, а с другой стороны ее должно окружить резервуаром с ртутью и с капиллярною трубкою. При выпучивании пластинки, ртуть в трубке будет подниматься и это поднятие ртути покажет давление, действующее на пластинку.[2] Предварительною работою должно установить соответствие взятого приблизительного манометра с нормальным. Если же изменение упругости счесть правильным до предела упругости стали, то такой манометр можно употреблять и для приблизительного опреде-

---

[1] Предварительно, чрез упомянутые ранее того отверстия, должно в трубку № 4 вогнать ртуть и тем вытеснить находящуюся в трубке № 4 поверх ртути воду, затем ртуть в № 4 опять следует слить до надлежащего уровня. Во все это время сообщение между № 1 и 2 заперто.

[2] Манометры этого рода могут найти многочисленные практические применения, например, для определения давления пороховых газов в артиллерии, для паровых котлов и даже для барометров. Они очевидно могут иметь чувствительность, гораздо бóльшую, чем обыкновенные анероидные манометры, ибо в этих последних меряется линейное, а здесь кубическое изменение формы упругого тела.

ления высших давлений, чем те, для каких он сличен. Во всяком случае необходимо делать, при пользовании такими манометрами, поправку на влияние температуры или окружить их водою определенной температуры.

Для точного определения давлений, незначительно превышающих 60 метров ртути (до предела разрыва взятых трубок, то-есть, примерно до 100 или 120 метров), можно довольствоваться тем же сложным манометром, который служит и до 60 м., ничего не изменяя в нем, а поступая следующим образом: запрем сообщение 39-ой и 40-ой трубок и нашим манометром можно определить давление, равное 58 метрам ртути. В запертую снизу трубку № 40 накачаем теперь воздух (окружив трубку эту водою, дабы удержать температуру) до желаемого давления, которое и определим тем же манометром. Положим, что мы накачаем воздух до 58 метров давления. Этот воздух запрем теперь краном в верхней части трубки № 40, а потому на свободный конец манометра теперь будет действовать давление (не атмосферное, как в случае его открытого положения), равное 58 атмосферам, а потому с помощью нашего манометра (вновь соединив трубки № 39 и 40) можно определить давление, достигающее до 61 + 58 = = 119 метров.[1] Для давлений, еще бóльших, если опыт покажет, что трубки его выдерживают, должно калибровать верхнюю часть трубки № 40 и сжимая в ней газ (чрез накачивание в трубку № 40 снизу ртути) определять его упругость по занятому объему. Например, замкнем в трубку № 40 100 куб. сант. газа под давлением 58 метров и сдавим этот газ до того, чтобы он занял объем 70 куб. сант. Если закон сжимаемости воздуха выше 58 метров нам уже известен, то мы узнаем, какое давление имеет сжатый нами газ. Положим, что по этому закону окажется, что 100 объемов газа при 58 метрах сдавливаются в 70 объемов при давлении 100 метров, а потому наш манометр

---

[1] Пользуясь подобным приемом, можно с малым открытым манометром изучить сжимаемость газа и до весьма высоких давлений. Имеем, например, открытый манометр, отвечающий 10 атмосферам (7,6 метра высоты), определим с точностью сжимаемость до 7 метров. Открытый конец манометра закроем при давлении барометра, зная объем и температуру замкнутого воздуха; тогда на другой конец манометра можно действовать сильнее сжатым газом, и давление его определится по сумме высоты ртутного столба и упругости воздуха, давящего на верхний мениск ртути. А эту упругость мы уже узнаем с точностью, пока она достигнет до 10 атмосфер, если нам известен ранее закон изменения плотности и упругости газа до 10 атмосфер и если определим объем, какой займет закрытый воздух. Следовательно этим способом узнаем сжимаемость газа до 20 атмосфер, а теперь можно итти и далее, то-есть, еще более сдавливать воздух, находящийся на верху манометра. А потому с подобною комбинациею закрытого и короткого открытого манометра можно довольно точно изучить сжимаемость газов до больших давлений. Так я и думал итти первоначально, пока не решился прибегнуть к сложному вышеописанному манометру, представляющему больше удобств и ручательств в точности. Впрочем и упомянутый здесь способ я думаю применять в предстоящем исследовании и полагаю, что другие исследователи, занимавшиеся вопросом о сжимаемости газов, не имели в виду упомянутого способа, потому что иначе наши знания о сжимаемости газов были бы вероятно более полны. По этим то причинам я и описал здесь этот простой способ изучения сжимаемости газов.

будет теперь служить для давления $= 61 + 100$, то-есть для 161 метра давления.

Но таких давлений в действительности наши стеклянные трубки едва ли вытерпят, а потому для давлений выше 100 метров я предполагаю устроить второй манометр, подобный первому, но с трубками из стали, то-есть из ружейных стволов, только одна последняя трубка этого манометра будет стеклянная. По уровню ртути в этой трубке можно судить об уровне ртути в остальных трубках, [1] а сличив этот манометр с первым, можно знать, какое давление выражает высота ртути в последней трубке второго манометра. Затем, соединив первый манометр со вторым (и следующими) можно определять системою подобных манометров давления беспредельно большие. Имея в виду в настоящее время опыты до тех только давлений, какие выдержат указанные выше стеклянные трубки, я не останавливаюсь над другими предполагаемыми мною способами точного определения более высоких давлений, но полагаю, что точное и прямое определение весьма высоких давлений возможно при средствах, доступных уже ныне для выполнения. *Если же для одного газа*, например, для водорода, *будет определен эмпирический закон сжимаемости, то при помощи закрытого манометра*, наполненного этим газом в сжатом виде, можно уже *определять и точно, и удобно давления*, встречающиеся при дальнейших исследованиях.

Переходя к описанию средств, которые предполагаю употребить для *сжимания газов* до значительных плотностей, я должен начать с того, что приборы, употребленные для этой цели Реньо и Наттерером, дают уже возможность достичь желаемой цели и мне только остается упомянуть о том, что при помощи ртутного насоса, проектирование которого взял на себя Н. П. Петров, я предполагаю сгущать газы только до давлений в 40 или около того атмосфер, потому что при высших давлениях клапаны насосов служат уже не так хорошо и в накачивании проходит очень много времени, а потому дальнейшее сжатие газа я предполагаю производить, [2] при помощи стального *сгустителя*.

Этот последний, как и другие стальные части, взялся выполнить из литой стали А. А. Колокольцов на Обуховском сталелитейном заводе близ Петербурга. Сгуститель, предполагаемый мною, будет состоять из двух цельных, внутри выточенных, стальных сосудов, соединяющихся на дне стальным стволом. Каждый сосуд имеет емкость около 5 литров, формы эллипсоидальной, высотою около 46 сант., диаметром снаружи около 27 сантиметров, стенки толщиною около 6 сантиметров. Такие сосуды, судя по определениям г. Чернова и В. Л. Кирпичева предела упругости многих образцов обуховской литой стали, выдержат по крайней мере 700 атмосфер давления, а потому будут пригодны и для дальнейших опытов. Я предполагаю поставить один сосуд выше другого так, что когда все отверстия обоих сосудов

[1] В ружейном стволе возможно определять уровень ртути еще при помощи: 1) разрыва гальванического тока и 2) веса влитой ртути.

[2] Подобное же средство употреблено Реньо, но у него устройство иное. Relations etc. II, p. 557, фиг. 18, таблица VI.

открыты, то влитая в верхний сосуд ртуть наполнит нижний сосуд. Вольется столько ртути, чтобы весь нижний сосуд наполнился ею. Запрем теперь отверстия верхнего сосуда, а нижний сообщим одним отверстием с манометром и тем сосудом (назовем его *A* и положим его емкость $= 1^1/_2$ литрам),[1] в котором должно сжать газ, а другим отверстием (оба в верхней части нижнего сосуда) с насосом, позволяющим сгустить газ до 40 атмосфер. Когда станем накачивать газ насосом, то ртуть будет подниматься из нижнего сгустительного сосуда в верхний и сдавит в этом последнем воздух до давления не многим меньшего, чем у газа, сжатого в нижнем сосуде. Давление воздуха в верхнем сосуде можно определять приблизительным манометром, например, Бурдоновским и по нем можно будет судить о давлении газа в нижнем сосуде. Когда давление в нижнем сосуде сгустителя и в *A* дойдет до 40 атмосфер, тогда положим газ займет $4^1/_2$ литра в нижнем сосуде, а в верхнем давление будет менее 40 атмосфер. Теперь запрем кран, соединяющий нижний сосуд с насосом,[2] и усилим каким-либо способом давление в верхнем сосуде. Тогда ртуть из него будет входить в нижний сосуд, и газ, в нем находящийся, вгонится в сосуд *A*. Если таким образом весь газ вгонится в сосуд [3] *A*, то в этом последнем давление достигнет примерно до 160 атмосфер. Если бы сосуд *A*, в который вгоняется газ, имел емкость около 275 куб. сантиметров, а в сгустителе содержалось бы 4,5 литра газа под давлением 40 атмосфер, то, вытеснив весь газ из сгустителя в *A*, можно было бы достичь в *A* давления в 700 атмосфер. Эти расчеты я привожу для того, что ими определяется размер сосудов, назначаемых для собирания и взвешивания сгущенного газа. Что же касается до средств, которыми в верхнем сгустительном сосуде будет увеличиваться давление выше 40 атмосфер, то ими могут служить: выделение газа, например, водорода химическими способами, развитие паров жидкой угольной кислоты, при чем потребуется нагревание верхнего сосуда, накачивание воздуха и воды, или ртути в верхний сгуститель насосом, наконец, даже горение пороховой смеси в особом сосуде, сообщающемся с верхним сгустителем. Выгода сгустителя при этом только та, что в верхний сосуд могут безопасно попадать посторонние газы, влажность и другие подмеси и они при этом не станут изменять состава газа, который находится в нижнем сосуде. Для первых предстоящих опытов, доходящих до 80 атмосфер, достаточно будет пользоваться жидкою углекислотою, как это делал отчасти и Реньо в своих исследованиях.

Что касается до *сосудов, в которых* [4] будет собираться и *взвешиваться газ*, то при их устройстве надо принять в расчет: 1) сосуды должны быть по возможности велики, чтобы количество взвешиваемого газа было значительно; 2) они должны быть такой толщины и из та-

[1] [В подлиннике опечатка: $1^1/_2$ метрам. *Прим. ред.*].

[2] Все краны должны быть винтовые и нажимные, ибо они держат отлично сильно сжатый газ, как это видно во всех исследованиях Наттерера.

[3] Для того, чтобы судить об этом, предполагается в верхней части нижнего сгустительного сосуда иметь изолированный проводник, который при подъеме ртути до верху даст знать звонком о том, что весь газ выгнан.

[4] Эти сосуды и названы в предшествующем параграфе буквою *A*.

кого материала, чтобы выдержали, не изменяя пластическим образом своей формы, то давление, какое имеет заключенный в них газ; 3) они должны иметь герметический запор и 4) чтобы в то же время вес их с газом не превосходил наибольшую нагрузку, допускаемую чувствительными весами, взятыми для исследования. Поэтому необходимо иметь для разных давлений различные сосуды. Если за предел верного взвешивания счесть $^1/_2$ миллиграмма, то для достижения той степени точности во взвешивании, какую, судя по предыдущему, можно ждать от манометрических определений $\left(\frac{1}{20000}\right)$, должно иметь в деле не менее 15 граммов газа, а так как вес литра воздуха при обыкновенной температуре около 1,3 грамма, то для взвешивания воздуха под атмосферным давлением должно взять сосуд емкостью около 12 литров. Впрочем я считаю полезным взять для взвешивания газов под атмосферным давлением сосуд емкостью до 15 литров, так как придется взвешивать и водород, а 15 литров его весят не более 1,35 гр. при 0°, следовательно, тогда надо уже взвешивать с точностью до $\frac{1}{20}$ миллиграмма, чтобы достичь столь же точного результата, как и при воздухе. Однако произведя взвешивание для водорода при давлении в 5 атмосфер, можно будет довольствоваться и $^1/_4$ миллиграмма, ибо тогда в сосуд взойдет около 6,7 гр. водорода. На этом основан дальнейший расчет. Рассчитывая, что тот же сосуд, в котором будет производиться взвешивание при атмосферном давлении, должен выдержать и перевес целого давления атмосферы (когда будет взвешиваться пустым) полезно дать, судя по предыдущему, его стенкам такую толщину, чтобы сосуд выдержал газ, имеющий давление 5 атмосфер. Для этого можно взять стеклянный сосуд и его стенкам необходимо тогда придать, судя по наблюденному для стекла пределу упругости, толщину по крайней мере около 4 мм.,[1] а стеклянный шар, которого внешний диаметр = 31,4 сантиметрам, а толщина = 0,4 сантиметрам, будет весить около 3 килограммов. Так как полной равномерности толщины стеклянные стенки иметь не будут, то его надо сделать тяжелее, да сверх того должно прибавить вес металлического крана и газа (при 5 атмосферах давления 15 литров воздуха весят уже около 100 граммов), а потому должно принять, что взвешиваемый шар будет весить около 5 килограммов. Этим исходным соображением определяется не только наибольшая нагрузка весов, но и устройство сосудов для высоких давлений. Так, например, при давлениях выше 10 атмосфер предполагается взять стальной сосуд. Для того, чтобы в нем

[1] Для расчета принят наименьший из наблюденных Шевандье и Вертгеймом предел для разрыва стекла, а именно A = 100, для лучшего стекла он = 175 килограммов на кв. сант. По формуле $P = 2A\frac{R^3 - r^3}{R^3 + 2r^3}$, где P есть давление, при котором достигнется предел упругости или произойдет разрыв; у нас P = 5 (атмосф. или 5 кгр. на кв. сантиметр), A принимается = 100, R есть внешний и r внутренний диаметр шара. Так как емкость = 1500 куб. сант., то $r^3 = 3580$, а отсюда находим $R^3 = 3855$, следовательно R = 15,68, а r = 15,30. R — r = 0,38 сантиметра или около 4 миллиметров.

вмещалось такое же количество газа, как и в 15 литровом сосуде при давлении 1 атмосферы, он должен иметь объем около $1^1/_2$ литров. Сплошной стальной сосуд можно хорошо выделать, как указали мне на обуховском заводе, только при эллипсоидальной форме вместилища, особенно если большая ось к малой относятся, как 1:2; поэтому длина большой оси сосуда должна быть около 25, а малой около 12,5 сантиметров, чтобы вместилось 1500 кубических сантиметров. Теперь должно расчесть, какую толщину можно придать стенкам, чтобы вес их не превышал 4 килограммов, причем считается 1 килограмм на вес газа и крана. Считая удельный вес стали за 7,8, получим, что объем оболочки должен быть около 510 кубических сантиметров, а потому разочтем, что толщина стен сосуда должна быть около 0,65 сантиметра. Приняв ее равною 6 миллиметрам и зная, что в наибольшем поясе радиус равняется 6,25 сантиметрам, найдем, что сосуд наш из стали выдержит давление $P = A\,(R-r)\,\frac{R+r}{R^2+r^2}$, где A есть предел упругости стали, который для хорошей стали можно допустить = 1500 килограммам на кв. сантиметр (или 1500 атмосфер), а потому наш сосуд выдержит давление P до 140 атмосфер, ибо приблизительно R = 6,8, а r = 6,2. Тогда в сосуд будет вмещаться около 170 граммов воздуха. Для давлений еще бо́льших должно будет иметь сосуд меньшей величины, размер которого определится данными, приведенными выше.

Итак по роду исследования необходимы *весы*, на которых можно было бы взвешивать до 5 килограммов с чувствительностью и точностью до $^1/_2$ миллиграмма, а так как точность весов всегда меньше чувствительности, то требуя верности до $^1/_2$ миллиграмма, надо искать чувствительности до $^1/_4$ или еще лучше до $^1/_{10}$, потому что тогда и при взвешивании легчайшего газа, водорода, погрешность взвешивания не превзойдет погрешности отчитывания объемов. Поэтому задача сводится на устройство весов с нагрузкою в 5 килограммов на каждую сторону и с чувствительностью, по возможности до $^1/_{10}$ миллиграмма. Такая чувствительность $\frac{1}{50\,000\,000}$ едва разве превосходит ту, какой уже достигли лучшие механики, [1] а потому я надеюсь, что при помощи г. Брауэра мне удастся достичь желаемого результата, так как при проектировании весов я старался обратить внимание на разные обстоятельства, возвышающие чувствительность, ускоряющие и облегчающие взвешивание и выделку весов. Так как между моими соображениями есть такие, каких я до сих пор нигде не встречал, то я и остановлюсь с некоторою подробностью над предположенным мною устройством весов и системою взвешивания.

Удобство взвешивания, чувствительность весов и даже их точность, как я на то уже давно [2] обратил внимание, зависят прежде

[1] Напр., на парижской выставке 1867 г. парижский механик Колло выставил подобные весы. О подобных же весах фирмы Ертлинга упоминает Миллер в своем исследовании нового английского фунта (Philos. Trans. 1856).

[2] Лет 6 или 7 тому назад известный мюнхенский механик Штейнгейль устроил по моей просьбе для Технологического института на этом основании весы с зеркалом, трубкою и шкалою, как о том я говорю далее.

всего от возможности определения малых уклонений коромысла, чего нельзя достичь при помощи стрелки, обыкновенно находящейся при коромысле.

Если стрелка тонка, как то делается обыкновенно, то она гибка, дрожит, имеет самостоятельное колебание и, несмотря на значительные увеличения ее показаний трубою, ею нельзя определить малых углов отклонения. Если стрелка массивна и длинна и особенно, если она снабжена на конце прикрепленною к ней шкалою, на которую можно визировать, [1] то она своим значительным моментом, напрасно увеличивает вес коромысла, а следовательно уменьшает чувствительность весов. По этим причинам обыкновенное *устройство стрелки весов должно считать непригодным для достижения высшей чувствительности в весах.* Вследствие этого я считаю более рациональным определение углов (правильнее их тангенсов, которые в действительности и пропорциональны разности грузов) уклонения коромысла при помощи *делений*, нарезанных непосредственно *на одном из концов коромысла* [2] и при помощи *микроскопа* с нитями, направленного на них и расположенного на продолжении длины коромысла. [3] Самым же приличным устройством для определения малых уклонений коромысла однако должно считать такое приспособление, которое применяется, по предложению Поггендорфа, при магнитных наблюдениях, а именно *зеркало, прикрепленное* (лучше всего на продолжении оси качания) перпендикулярно *к коромыслу*, удаленную от него *шкалу* и зрительную отчетную (Ableseferнrohr) *трубу*, ибо при их помощи можно определять самые малые углы (двойные тангенсы их), а чрез то не только чувствительность весов возрастает, но и достигается много других удобств. Важнейшим из них я считаю возможность избежать навески малыми грузами, а чрез то достигается ускорение взвешивания, а при нем будет достигнута вернее всего и точность, особенно при определениях такого рода, как представляющиеся мне. Непосредственная нагрузка миллиграммов очень хлопотлива, рейтер, столь удобный для обычных взвешиваний, не годится для точных работ, потому что нало-

[1] В. С. Глухов в недавнее время снабдил свои весы от Лондонской фирмы Ладда и Ертлинга подобным устройством и достиг того, что микроскопом читает $\frac{1}{100}$ миллиграмма. Заменив стрелку плечом коромысла или зеркалом, трубою и шкалою, он вероятно определил бы еще меньшие доли. Прейскуранты этой фирмы и др. дают уже давно указания на чувствительность весов, особенно при малых грузах, до сотых долей миллиграмма.

[2] Уже давно механики, особенно в Америке, устраивают весы с указателем (стрелкой) на конце коромысла и тогда около коромысла помещают шкалу. По многим причинам это устройство, хотя и рациональнее обыкновенной стрелки, не годится для точнейших весов, и особенно вследствие возможности независимых изменений положения 0° шкалы и коромысла, что происходит от нагревания, сотрясений и т. п. Отчет с двух сторон неудобен.

[3] Микроскопу лучше придавать это, а не перпендикулярное к коромыслу положение, потому что тогда перемещения окажут меньшее влияние, тогда наблюдатель будет сбоку, — а это выгоднее, чем быть спереди, как это объяснено далее,— стрелка выходит длиннее и т. д. Шкале можно придать сверх того форму дуги, описанной радиусом плеча (ее деления можно нарезать и на подвеске чашек, но тогда замечаются колебания, независимые от коромысла).

женный на коромысло перемещает его центр тяжести, наблюдение же малых уклонений обычною стрелкою невозможно при большом перевесе, ибо малые доли уклонений тогда не наблюдаются, а при зеркале, шкале и достаточно увеличивающей трубе можно отчитывать и более мелкие части, чем сотые наибольшего (в 5°) уклонения. Если так расположить центр тяжести коромысла, чтобы при перевесе груза на 0,1 грамма уклонение было около 5°, то десятые доли миллиграмма найдутся тогда, когда можно легко отсчитывать уклонения в 20″ (секунд). При прямом отсчитывании стрелкою это невозможно, а при предлагаемой мною системе этого легко достичь, тем более, что *угол* уклонения чрез отражение *удваивается* и стрелке можно придать, удаляя шкалу, желаемую длину. Поэтому 0,0001 гр. отвечает в предыдущем расчете 40″, а тангенс 40″ при радиусе, равном 6000 миллиметров (т. е. шкала удалится от весов на 6 метров) равен 1,2 миллиметра, а на расстоянии 6 метров в трубу, увеличивающую раз в 20, уже чрезвычайно легко отсчитать такую величину, а потому *можно будет при таком устройстве* прямо, нагрузив только большие разновески (до сантиграмма или даже до дециграмма), *мелкие доли веса*, особенно *ниже сантиграмма, определять по наблюдению* в трубу *колебаний* коромысла. — А если 0,1 гр. произведет отклонение только на 5°, то центр тяжести можно удалить гораздо более, чем в обыкновенных весах, а чрез то ускорятся колебания, т. е. весы сделаются устойчивыми без ущерба чувствительности, да сверх того будет излишним особое устройство для поднятия центра тяжести к точке опоры, как то делается в обыкновенных весах.

Второе обстоятельство, которое необходимо постоянно иметь в виду, когда производят точные взвешивания, есть *влияние близости наблюдателя* на результат взвешивания. Оно происходит от двух причин. Во первых от того, что наблюдатель, кладя разновес, а особенно многие мелкие разновесы, нагревает одну сторону коромысла весов более, чем другую, а потому относительная длина плеч меняется. Если коромысло латунное, то при перемене температуры одного плеча на $^1/_{100}$ градуса оно сделается длиннее другого почти на 0,0000002, следовательно от того при нагрузке в 5 кгр. получится разность на 1 миллиграмм. [1] Вторая причина влияния наблюдателя состоит в том, что он изменяет состав (внося влагу и углекислоту выдыхаемого воздуха) и температуру воздуха в шкафу весов, а чрез то делается сомнительною поправка на вес вытесненного воздуха. Предположим, что до приближения наблюдателя влажность воздуха весов была 0,7, температура 20°, давление 760, а после приближения влага = 0,8, а тем-

[1] Чтобы можно было легко наблюдать такие малые разности температур, правильнее — перемены в относительной температуре плеч от времени первого до времени второго взвешивания, если взвешивание двойное, я предполагал поместить около коромысла чувствительный дифференциальный термометр, кроме термометров, определяющих температуру, что нужно для поправки взвешивания; но теперь думаю достичь еще большей чувствительности, поместив рядом с коромыслом весов другое легкое и чувствительное коромысло с микроскопом. Если произойдет нагревание одной стороны весов, то его можно узнать по уклонению, замечаемому в положении этого добавочного коромысла.

пература 20,°5 и пусть наблюдаемый вес = 2000 гр. и взвешиваемый предмет имеет объем 10,25 литров. Введя поправку по первым данным, считая гири удельного веса 8, получим истинный вес = 2012, 8197 гр., а по вторым он будет = 2012, 8160, и нельзя ни одного из этих весов счесть за истинный, да и равновесия полного не настанет, потому что сосуд не нагрелся, воздух около сосуда холоднее и т. п. Приемы, употребленные Реньо, [1] не вполне уничтожают все эти неточности, потому что двух шаров действительно равного объема и свойств подобрать нельзя, требуется много времени на одно взвешивание, да при том Реньо не исправил своих данных на вес приложенных гирь, а достаточно привеска 1 грамма, чтобы поправка на него была (если он из латуни) равна 0,0002 грамма, [2] но все-таки приемы Реньо должны лечь в основу всем дальнейшим улучшениям. Близость наблюдателя во все продолжительное время окончания взвешивания так сильно изменяет вес больших предметов, что при таком взвешивании становится необходимым удалиться от весов, а иначе равновесия не наступает, если нет правильных колебаний. Ширма не устраняет этого неудобства, как мне давно показал опыт. При описанном способе последнее отсчитывание производится трубою и потому наблюдатель уже неизбежно удаляется от весов. При том, и находясь при весах, он может действовать с коротгой стороны их ящика, а не с длинной и оттого его влияние уменьшается. Для возможно полного устранения влияния наблюдателя на точность взвешивания, я считаю необходимым не только сократить время взвешивания, разделить ящик для весов на ярусы и окружить возможно худшими проводниками тепла, [3] но и пропускать чрез ящик пред концом взвешивания сухой воздух. Верхний шкаф весов должен назначаться только для коромысла и малых гирь, а груз и крупные гири должны ложиться на чашки нижнего ящика, куда имеет доступ наблюдатель только в начале взвешивания. Нижнюю часть шкафа для весов я предполагаю сделать столь массивною (склеить из нескольких деревянных фанерок), чтобы она могла не только служить надежною опорою, но и выдержала бы давление атмосферы, если потребуется произвести взвешивания в безвоздушном пространстве. Верхняя часть шкафа должна быть съемною для того, чтобы можно было ее заменить другим более массивным ящиком, представляющим колокол воздушного насоса, когда желаем произвести взвешивание в безвоздушном пространстве. Когда все гирьки положены, тогда в предполагаемых весах наблюдатель должен отойти к зрительной трубе, [4] а между тем полезно случайный и содержащий влагу *воздух весов заменить сухим воздухом* определенной температуры. Вентилятор, доставляющий такой воздух, предполагается устроить

[1] Relation I—125, 154.

[2] От этих то причин, вероятно, отчасти зависит погрешность в весе литра воздуха, доходящая у Реньо (стр. 138) до $^1/_{2000}$.

[3] Для чего очень удобны двойные стекла для верхнего ящика и толстые деревянные стенки для нижнего.

[4] Впрочем зрительная труба может быть вделана и в футляр весов, потому что от ее расстояния не зависит чувствительность отчета, которая изменяется только от расстояния шкалы и увеличивания трубы.

в помещении для опытов, потому что при помощи продувания воздуха можно с удобством удерживать в манометре постоянную температуру. Для этой цели воздух, доставляемый вентилятором, будет проникать чрез металлические трубы, положенные в баке с водою, температуру которой можно по произволу регулировать, и потом пройдет в шкаф для манометра. Воздух, назначаемый для весов, пройдет сверх того чрез сушильные вещества и чрез вату, взойдет в среднюю часть дна весов, пройдет чрез боковые отверстия (назначенные для прохода чашек) в верхний ящик весов и выйдет чрез особое отверстие, сделанное в крышке весового футляра. Главная цель при этом заменить влажный воздух сухим

Количество влажности меняется в воздухе, а чрез то при данной температуре и давлении меняется и вес воздуха, а следовательно, для точной поправки кажущегося веса на вес вытесненного воздуха необходимо знать не только давление барометра и температуру воздуха, но и степень его влажности, и ее надо, строго говоря, наблюдать в шкафу весов, что весьма неудобно при многочисленных взвешиваниях. Помещение гигроскопических веществ в весовой ящик не устраняет этого неудобства, потому что открывание ящика и приближение к нему наблюдателя приносит к весам новые неопределяемые количества влажности. Когда чрез ящик весов прошло надлежащее количество (опыт укажет какое) сухого воздуха, тогда должно произвести окончательное взвешивание, определяя трубою тангенс угла отклонения. Такой прием не только даст возможность ввести точную поправку на вес воздуха, но и послужит для того, чтоб с металлических частей весов удалилась осевшая на них случайно влага и для того, чтобы сделать температуру всех частей весов однообразною. Я думаю, что замеченное мною не раз непостоянство данных при взвешивании больших предметов может быть устранено скорее всего вышеописанным способом.

Для того, чтобы получить несомненно точную поправку на взвешивание в воздухе я считаю полезным произвести несколько взвешиваний в безвоздушном пространстве. Для того нижний и верхний ящики весов должно устроить герметически закрывающимися и положив вычисленное, по весу в воздухе, количество гирь, выкачать воздух из ящиков весов, заменив сперва верхний стеклянный ящик весов другим более массивным, о котором упомянуто было выше. Для выкачивания воздуха будет служить та труба (снабженная манометром и краном), чрез которую вдувается сухой воздух. Особенно важно определение абсолютного веса шара,[1] служащего простейшим средством *для поправки на вес вытесненного воздуха*. Представим себе пустой шар, герметически запаянный, наружный объем которого при $t°$ равен V куб. сант. и пусть его абсолютный вес $= P$ граммов, кажущийся вес его в граммах будет:

$$p = P - e\left(V - \frac{p}{d}\right),$$

[1] Такой шар предложен и употребляется мною с 1859 года. Смотри Comptes rendus 1860. T. L p. 54, также «О соединении спирта с водою» 1865, стр. 55.

где d означает вес одного кубического сантиметра гирь, а e — одного кубического сантиметра воздуха во время взвешивания. Поэтому:

$$e = \frac{P - p}{V - \frac{p}{d}}.$$

Следовательно, если известен абсолютный вес шара, то взвесивши его в данных условиях, узнаем вес кубического сантиметра воздуха, а потому и можем другие взвешивания в том же воздухе исправить на вес вытесненного воздуха и притом с значительною точностью. Если объем шара будет 10 литров, т. е., 10 000 кубических сантиметров и $d = 8$, то при определении веса с точностью только до 1 миллиграмма вес кубического сантиметра воздуха определится с точностью до 0,00000021 грамма, [1] чего нельзя сделать другими способами, без продолжительной новой работы, особенно, если есть необходимость принять во внимание содержание влажности.

Известно, что только двойное взвешивание можно считать точным до предела чувствительности весов, но для него требуется много времени, в течение которого могут совершаться такие перемены в температуре воздуха, которые повлияют на вес большого предмета (напр., упомянутого выше шара в 15 литров) в большей мере, чем мера чувствительности весов. Кроме того, во всяком случае в результате двойного взвешивания должно допустить погрешность, вдвое бóльшую, чем чувствительность весов. Так, если весы чувствительны до 0,0001 гр., то в результате двойного взвешивания надо предполагать погрешность в 0,0002 гр. По этим причинам должно стараться избежать двойного взвешивания, а помимо его (так как нельзя достичь полного равенства длины плеч и пр.) можно достичь точного результата только тем способом, упоминаемым давно и употребленным мною при исследовании смесей спирта с водою, [2] который состоит в помещении на одну чашку весов всегда гири такого веса, для коего назначаются весы, и в нагрузке другой чашки предметом и гирями, дополняющими вес до предельного. Такую *систему взвешивания* я предполагаю употребить и при предстоящем исследовании, так как она представляет следующие удобства и преимущества. 1) Нагрузка весов, а следовательно прогиб коромысла, угол отклонения на данный груз и чувствительность тогда остаются при всех взвешиваниях одни и те же, а потому 2) можно уничтожить тот регулятор центра тяжести, каким снабжаются обыкновенно точные весы и придать им раз навсегда желаемую чувствительность и желаемое положение центра тяжести и 3) раз

---

[1] Такая точность в определении веса кубического сантиметра воздуха совершенно достаточна для поправки веса сосуда емкостью в литр при точности взвешивания до $^2/_{10}$ миллиграмма. Ошибаясь в барометре на $^1/_{20}$ миллиметра, или в температуре на $^1/_{20}$, и не принимая в расчет влаги воздуха, делают гораздо большую погрешность в определении веса 1 кубического сантиметра воздуха.

[2] О соединении спирта с водою. 1865 стр. 52. Мне известно одно указание на этот способ взвешивания, а именно в каталоге физических приборов парижского механика Саллерона.

установив соответствие между тангенсами углов отклонения и разностями веса на обеих чашках, можно всегда руководствоваться одними и теми же числами для суждения о весе по углу отклонения коромысла. 4) Если на одну чашку положить, например, в наших весах 5 выверенных килограммов, а на другую уравновешивающий груз, который постоянно на эту чашку и будет помещаться, то, положив вновь на первую чашку 5 килограммов, легко каждый раз удостовериться в том, что весы не претерпели изменения, например, в том, что температура обоих плеч коромысла одинакова, *а потому взвешивание будет иметь все достоинства двойного взвешивания, хотя будет единичное.* 5) Чрез это время взвешивания сокращается по сравнению с двойным взвешиванием и точность такого взвешивания будет больше, чем по способу Борда. 6) При таком способе взвешивания все дело взвешивания ограничивается работою на одной их стороне, а это не только облегчает работу взвешивания, но и уменьшает вредное влияние близости наблюдателя, потому что позволяет ему поместиться не спереди, а сбоку весов, и 7) при таком помещении наблюдателя достигаются технические выгоды в устройстве весов: устройство арретировки для чашек может быть совершенно независимо от арретировки коромысла, хотя и на одной оси и оно может быть солидно, чего нельзя сделать при арретировке спереди одним арретиром, останавливающим коромысло и чашки; затем при помещении наблюдателя сбоку весов рождается легкая возможность избежать стрелки и заменить ее или микроскопом, или зеркалом с трубою и шкалою, а эти приемы, как видели выше, делают весы более чувствительными.

Теперь мне остается описать устройство коромысла, потому что прочие подробности моего проекта весов (арретирование, устройство чашек и т. п.) или не столь существенны, или же не могут быть ясно описаны без рисунка.

Первый вопрос, рождающийся относительно коромысла весов, назначаемых для данных чувствительности и нагрузки, есть *вопрос о длине плеч*, ибо ею определяется уже отчасти и вес коромысла. Знаменитый математик Ейлер, в своем исследовании (относящемся к 1738 г.) о весах,[1] дал те начала, которых держатся с тех пор все механики и которые излагаются во всех курсах физики. Одно из правил (Regula III p. 10 и 18), данное им, состоит в следующем: «Коромысло весов для их чувствительности должно быть по возможности длинно». Оно легко выводится из известной формулы

$$\operatorname{tg}\alpha = p\,\frac{1}{m}\cdot\frac{l}{P}\,,^{2}$$

относящейся к равноплечему коромыслу, у коего точка опоры и точки привеса чашек лежат на одной прямой линии. Но следствие, выведен-

[1] Commentarii Academiae scientiarum I, Petropolitanae T. X, Ann. 1738 p. 3 «Disquisitio de bilancibus. Auctore L. Eulero».

[2] α — угол уклонения коромысла, когда на одной чашке есть перевес p. Вес коромысла P, длина плеча l, а m расстояние центра тяжести коромысла от точки его опоры.

ное Ейлером и применяемое практиками, справедливо только для математического негибкого коромысла, для коего можно вообразить вес P независимым от l, а не для физического, потому что вес коромысла и даже отчасти величина m зависят от его длины. Полная теория физических весов могла бы содействовать улучшению устройства этого важного прибора, но здесь достаточно ограничиться некоторыми элементарными соображениями, дабы доказать, что *чувствительность весов стоит вовсе не в той зависимости от длины коромысла, как то общепринято.* Чувствительность весов есть частное из наименьшего груза p, какой еще может наблюдаться весами, на вес Q чашки с наибольшим разновесом. В нашем примере чувствительность определится из того, что $p = 0{,}0001$, а $Q = 5000$ граммов и она $= \frac{1}{50\,000\,000}$. Частное $\frac{P}{Q}$ должно сделать наименьшим, чтобы получить выгоднейшее устройство весов. Из вышеприведенной формулы Ейлера очевидно, что

$$p_1 = \operatorname{tg} \alpha_1 \cdot m \frac{l'}{l} \qquad \text{I}$$

где α_1 есть наименьший наблюдаемый угол уклонения коромысла. Ясно поэтому, что чувствительность будет тем большая (т. е. p_1 тем меньше), чем 1) меньший угол α_1 можно будет наблюдать в весах и это справедливо во всех случаях, потому что α_1 не зависит от m, P и l, а только от способа, каким наблюдаются уклонения коромысла. Стрелка есть худшее из средств, а наилучшее есть зеркало, трубка и шкала, потому что, увеличивая силу трубы и удаляя шкалу от зеркала, можно определять малейшие величины α_1; 2) чувствительность тем больше, чем m меньше, но эту величину известными способами механик может довести до всякого желаемого minimum, а потому здесь об этом не должно быть и речи. При той системе взвешивания, какую я думаю применить, нагрузка всегда одна и та же, а потому, если назовем чрез M наибольший прогиб коромысла, какой можно допустить в весах, то по учению об упругости это

$$M = \frac{2Q \cdot (2l)^3}{ah^3 \cdot 4E} = \frac{4Ql^3}{ah^3E} \qquad \text{II}$$

если счесть коромысло призматическим, при длине $2l$, высоте h и толщине a и где E есть коэффициент упругости материала, из коего сделано коромысло. Если коромысло представляет, как это и должно быть, балку, приближающуюся к форме тела равного сопротивления изгибу, то вышенаписанное значение M изменится, но для простоты изложения мы допустим призматическую форму, ибо вывод в сущности будет тот же. Из уравнения II следует, что

$$l = h \sqrt[3]{\frac{MEa}{4Q}} \qquad \text{III}$$

где M есть условная, но постоянная величина, и если она дана на основании свойств взятого материала или на основании тех соображений,

которые вытекают из допущения при изгибе возможных перемещений центра тяжести, то по ней можно определить и длину коромысла. 3) Чувствительность наконец тем больше (значение p_1 тем меньше), чем меньше частное $\frac{P}{l}$. Если возьмем призматическое коромысло и означим чрез Δ плотность материала, то очевидно, что $P = \Delta 2 l h a$, а потому

$$\frac{P}{l} = 2\Delta h a.$$

Наименьшее значение этой дроби, а следовательно и *чувствительность гибких весов*, очевидно, не *зависит от длины коромысла*.[1] Если же допустить гибкость, то в $\frac{P}{l}$ надо вставить значение l по III, тогда

$$\frac{P}{l} = \frac{2\Delta l h a}{h\sqrt[3]{\frac{MEa}{4Q}}} = 2\Delta l \sqrt[3]{\frac{4a^2Q}{ME}}; \qquad \text{IV}$$

Следовательно, наименьшее значение $\frac{P}{l}$ достигается при малом Δ, при малой длине l, при малой толщине a, при меньшем грузе Q и при большем значении допускаемого прогиба M и коэффициента E упругости материала. Подставляя IV в I получим: [2]

$$p_1 = \operatorname{tg}\alpha_1 \cdot m\, 2\Delta l \sqrt[3]{\frac{4a^2Q}{ME}}, \qquad \text{V}$$

а потому

$$\frac{p_1}{Q} = \operatorname{tg}\alpha_1 \cdot m \cdot 2l\Delta \sqrt[3]{\frac{4a^2}{MEQ^2}}. \qquad \text{VI}$$

Значит, при прочих равных условиях, чувствительность весов $\frac{P_1}{Q}$ возрастает с нагрузкою Q, хотя p_1 и будет тем меньше, чем меньше Q. Действительно ныне легко уже изготовляются весы, которые при нагрузке в 10 килограммов чувствуют сантиграмм, при нагрузке в 1 кгр. миллиграмм и т. д. $\left(\frac{p_1}{Q} = 0{,}000001\right)$, но не умеют делать с такою же легкостью весов, которые при малом грузе чувствовали бы $\frac{1}{1\,000\,000}$ нагрузки, хотя некоторые художники и достигают этого. Из уравнения V, определяющего условия чувствительности гибких, физических

[1] Если коромысло ромбоидально, имеет толщину a, высоту по концам тоже a и в средине na, то частное $\frac{P}{l} = \Delta a^2(n+1)$; подобный же вывод получится и при других формах, близких к формам балки равного сопротивления.

[2] Строго говоря, допуская изгибы, мы уже не должны применять формулу I, но можно так устроить коромысло, чтобы при прогибе острия были на одной прямой линии. Напомню, что я не имею в виду дать здесь полную теорию физических весов, для коей необходимо принять во внимание трение привешивания на призмах и много других обстоятельств.

весов, не принимая во внимание трения, ясно, что *весы будут чувствовать тем меньшую нагрузку*, при прочих (α_1 и m) равных условиях, *чем легче материал коромысла, чем короче и тоньше коромысло, чем больше коэффициент упругости материала, из которого приготовлено коромысло* и чем больший прогиб можно допустить в них по условиям взвешивания. Часть этих условий (малое a, Δ, большое E — оттого коромысло сильно куют — это увеличивает коэффициент упругости) применяется давно на деле, часть условий едва достижима (так величину a нельзя сделать очень малою, коромысло будет гнуться в сторону, не будет устойчиво), а часть (малость длины и значительность допускаемого прогиба), сколько мне известно, [1] не обращала еще на себя внимание ни теоретиков, ни практиков, как условие чувствительности весов.

Таким образом длина коромысла весов не определяется ни их нагрузкою, ни их чувствительностью (а совокупностью многих условий), а потому для простейшего определения ее необходимо избрать другие данные. Для этого может служить: во первых, определение размеров наибольших предметов, которые помещаются на обе (для симметрии, которая необходима для равенства потерь в воздухе) чашки весов. Так как наибольшие шары (в 15 литров), какие мне придется взвешивать, имеют в диаметре около 32 сантиметров, то, оставив свободное место для качания их, я принял длину коромысла, равною 40 сантиметрам, т. е. для каждого плеча 20 сантиметров. Другое соображение, могущее помимо размера взвешиваемых предметов определить длину

[1] Гамбургский механик г. Бунге (Paul Bunge) обратил уже внимание на короткость коромысла, но повод, который он выставляет для того, не верен, и его система весов едва ли хороша. Как повод для устройства короткого коромысла г. Бунге выставляет то, что тогда весы качаются быстрее, но зато можно доказать способом, употребленным г. Бунге (см. его прейс-курант, который мне был одолжен г. Глуховым), что тогда чувствительность уменьшится. Дело в том, что если груз велик, сравнительно с весом коромысла (напр. в проектированных мною весах вес коромысла 400 г., а всего груза с чашками около 11000 г.), то время одного колебания весьма близко выразится формулою:

$$t = N \frac{l}{\sqrt{P \cdot M}}$$

где N есть постоянная величина, а прочие буквы те же, что и в прежних формулах следовательно, времена колебания весов возрастают с длиною коромысла так же быстро, как углы отклонения коромысла, а потому, чем чувствительнее весы, тем времена их колебания длиннее и сокращать время колебания на счет длины можно только на счет чувствительности, если не принять во внимание других условий. Опыт утверждает справедливость этого вывода. Что же касается достоинства системы весов г. Бунге, то о ней можно судить уже по огромному числу винтов, имеющихся на его коромысле, и потому еще, что стальное коромысло имеет столь значительную высоту, что оно будет неизбежно неустойчиво, т. е. будет легко изгибаться в сторону. Практика больших механических изделий давно показала, что высота балки не должна превосходить более, чем в 10 раз, ее ширину. Упомянув здесь о весах г. Бунге, я считаю долгом сказать о том, что по простоте устройства и качеству изделий я считаю весы, изготовляемые г. Саллероном в Париже, за достойные всякой похвалы, по крайней мере, в тех трех образцах, которые были им для меня изготовлены, а к лучшим из виденных мною весов я причисляю, вместе с г. Глуховым, весы лондонских мастеров Ладда и Ертлинга (ныне фирма Ертлинга).

коромысла, состоит в следующем: боковым призмам, из чего бы они ни были сделаны, должно придать некоторые размеры (к сожалению учение о сопротивлении материалов не дает способов вычислить эти размеры), а следовательно и некоторый вес; затем в коромысле должны быть части, закрепляющие эти боковые призмы, и, зная вес этих неизбежных частей, можно уже вычислить, какую наивыгоднейшую длину должно придать коромыслу для того, чтобы вышло наименьшее значение дроби $\frac{P}{l}$. Судя по тому, что я предполагаю придать боковым призмам вес около 7 граммов, В. Л. Кирпичев вычислил и, вероятно, публикует свой способ расчета, что наивыгоднейшая длина плеча коромысла весов, нагрузка коих = 6 килограммам (груз с чашкою и запасным весом) должна быть приблизительно = 12 сантиметрам, если, как предположено мною, сделать коромысло из алюминиевой бронзы. Но при этом он нашел также, что, изменяя эту длину в 20 сантиметров, как того требует вышеуказанное условие, мы только очень незначительно увеличим значение частного $\frac{P}{l}$. Есть еще третий способ определения длины коромысла, но для него нет ныне достаточных практических данных: острия призм, какой бы твердости они ни были, при нагрузке сдавливаются, так сказать, тупеют, хотя это изменение формы и принадлежит к числу упругих. Подобное же изменение (вдавливание) совершается и в пластинке, на которой покоятся острия. Если бы была известна мера изменения формы острия, то по ней и по требуемой чувствительности можно было бы определить длину коромысла. За недостатком сведений этого рода должно ограничиться для уменьшения этого влияния выбором наиболее твердого материала для призм и их подкладок. Давно уже делают весы с агатовыми призмами; ныне такие изготовляет известная лондонская фирма Эртлинга, а, заменяя агат топазом, я думаю, можно достичь еще лучших результатов. Действительно *топаз* обладает ясным листопрохождением (параллельным конечной плоскости) и потому призма, вышлифованная так, чтобы листопрохождения шли параллельно острому ребру и были вертикальны, а пластинки, вышлифованные по плоскостям листопрохождения, будут удовлетворять в высшей мере желаемому условию твердости, тем больше, что топаз и сам по себе гораздо тверже кварца. При том топаз из всех твердейших кристаллических минералов (выше его стоит рубин) встречается чаще в больших однородных кристаллах и один из таких уральских образцов дан мне по обязательности профессора нашего Университета М. В. Ерофеева.

Найдя таким образом длину коромысла и задавшись размерами боковых (длина ребра 1 сантиметр) и средней (2 сантиметра) призм и мест для их закрепления, я вычертил форму коромысла, на основании следующих соображений: 1) нужно было соединить три призмы в одну целую балку, представляющую по возможности фигуру балки равного сопротивления изгибу; 2) отношение всей полной высоты балки в ее средине к ее толщине я допустил как 10 к 1; 3) при нагрузке в 6 кило на каждую боковую призму я допустил прогиб не более как в $^1/_{10}$ мил-

лиметра, что изменяет расстояние центра тяжести только на весьма малую долю; 4) коромысло я предполагал сделанным из алюминиевой бронзы, коэффициент упругости которой (по Филиппсу = 13 000 килограммам на кв. миллиметр) не многим меньше, чем для стали (от 17 000 до 21 000) и больше, чем латуни (9000), серебра (7000) и др. известных сплавов. Алюминиевая бронза представляет все преимущества для выделки коромысла и, если ее можно заменить каким либо другим трудно окисляемым [1] металлом, то разве никкелем (E = 23 000 по Филиппсу) или алюминием (коэффициент упругости 8000 по Филиппсу — но зато он легок), но эти металлы не могут быть считаемы столь однородными. 4) Вычертив по предыдущему размеры и фигуру *сплошного* коромысла, я придал ему такое придаточное *скрепление снизу*, какое потребовалось для того, чтобы при той же толщине коромысла поместить его центр тяжести близь острия средней призмы.

По этим расчетам вышло коромысло весом в 400 граммов. В. Л. Кирпичев, по моей просьбе, также вычертил коромысло алюминиевой бронзы, руководствуясь тем, чтобы натяжение во всех сечениях вырезного коромысла было по возможности одно и то же, а именно не более 75 кгр. на квадратный сантиметр, при чем должно заметить, что алюминиевая бронза выдерживает, до предела упругости, натяжение до 1400 кило на кв. сантиметр. Полученные им размеры столь близко сошлись с найденными мною (вес вышел опять около 400 граммов), что на найденной форме коромысла я и решился остановиться.

Приводя здесь соображения, касающиеся до устройства коромысла, я имею в виду указать, что вопрос об устройстве весов заслуживает более тщательной разработки и что ныне употребляемые модели весов иногда страдают отсутствием рациональности, которую должно требовать от такого важного мерительного прибора, каковы весы. Как на пример нерациональности в устройстве многих весов я укажу на то, что в большинстве их на коромысле находится много винтов. У меня в распоряжении находятся весы известнейших мастеров, в которых можно насчитать более 20 (стальных, но Ладд и Эртлинг делают, кажется, уже все винты латунными — это лучше) винтов для закрепления призм, для укрепления гаек и т. п. Это вредит коромыслу, потому что винтовое закрепление не только не прочно, но и подвергается временным изменениям при перемене температур, а в результате ведет к объяснению некоторых всем известных, иногда ничем не объяснимых быстрых изменений в весах, которые при том иногда со временем уменьшаются или исчезают. Притом, если винты допускают регулирование положения призм, то зато придают им и некоторую шаткость, отчего, вероятно, весы и требуют со временем новой регуляции, а иначе теряют в своем достоинстве. Этот недостаток я предполагаю устранить, уничтожив по возможности всякие винты в коромысле. Уничтожая стрелку, груз, регулирующий центр тяжести, как то было объяснено выше, и

[1] Впрочем окисление с поверхности маловажно. Сталь была бы наилучшим материалом для коромысла, если бы можно было избегать изменчивости ее от намагничивания и случайного приближения железных предметов.

закрепляя призмы и зеркало [1] вдавливанием в нагретое подходящее отверстие коромысла, я думаю, что будет возможно избежать всяких винтов в коромысле и тем придать ему постоянство, какого с многими винтами оно иметь не может. Закрепление средней призмы вдавливанием уже давно введено, но тот же способ едва ли не выгоднее всякого другого и для укрепления боковых призм. При этом, конечно, уже должно отказаться от возможности достичь полного равенства плеч, но оно и не нужно при способе двойного взвешивания, да и при винтах не достигается, ни в совершенстве, ни с постоянством.

Переходя к краткому описанию других предполагаемых мною приемов для исследования, считаю не излишним указать те начала, которым должны, по моему мнению, удовлетворять всякие весы, назначаемые для точных работ: 1) материал коромысла должен обладать однородностью, малою изменяемостью, [2] легкостью и значительным коэффициентом упругости. Сумма этих свойств хорошо соединяется в литой и хорошо прокованной алюминиевой бронзе; 2) коромысло должно быть по возможности коротко, высота его должна быть по возможности велика по отношению к толщине; 3) в нем должно избежать (для постоянства) винтов; 4) призмы и подставки к ним должно делать из наитвердейшего материала, а для этого приличнее всего брать горный хрусталь и топаз; 5) размеры коромысла для данной нагрузки должно расчесть по известным принципам устройства балок; 6) боковые призмы должны быть в два раза короче средней; 7) простейшею системою точного взвешивания должно считать нагрузку постоянную и определение веса чрез разность, так как при нем облегчается механику устройство весов, упрощается самое взвешивание и так как этот способ, не имея недостатков способа Борда, имеет все его достоинства. 8) Коромысло и воздух в ящике весов должно по возможности предохранить от влияния близости наблюдателя, а для этого полезно весы строить в два или три яруса и в нижнем помещать чашки для предмета и крупных гирь. Для убеждения в равенстве температур обоих плеч необходимо иметь в них или дифференциальный термометр или особое свободное коромысло. 9) Употребление рейтера, как предмета, изменяющего положение центра тяжести коромысла, должно избегать, а для определения малых навесок определять угол отклонения коромысла. 10) Для чувствительности весов столь же важно, как уменьшение расстояния центра тяжести, так и такое устройство, которое допускает определение малых углов отклонения. 11) Для этой последней цели стрелка с выгодою может быть заменена зеркалом, шкалою и трубою, так как чрез отражение угол отклонения удваивается и оптическая стрелка может быть сделана длинною, без ущерба чувствительности, ибо не имеет веса. 12) Стрелка весов во всяком случае с пользою заменяется самым коромыслом. 13) От правильного действия аррети-

---

[1] Считаю весьма неудачным применение гальванической позолоты коромысл и даже стальных его частей, как то делают некоторые механики.

[2] Вдавить в проектируемых весах придется не самую призму, а ту поперечную металлическую часть коромысла, в которую вклеится мастикою плотно пришлифованная топазовая призма.

ровки зависит не только сохранение весов, но и точность или согласие взвешиваний. 14) Острия коромысла не должно при арретировке удалять от подставок, потому что иначе получаются вредящие призмам удары. Коромысло должно арретированием только останавливать. [1] 15) Для поправки на взвешивание в воздухе выгодно продувать в ящик весов сухой воздух пред окончательным определением веса. 16) Простейшее и весьма точное средство для определения веса воздуха, что нужно для поправки найденного веса, дает герметический шар, которого объем и вес заранее известны. К этим условиям устройства [2] весов и взвешивания должно прибавить и другие общеизвестные правила и я был бы счастлив, если бы мои замечания о весах возбудили появление точного, сопровождаемого математическим анализом и опытами [3] подробного исследования о весах, устройство которых немного изменилось с конца прошлого столетия по сих пор, я думаю потому именно, что после Ейлера никто не занимался теориею этого важного прибора. Я думаю, что, приложив к весам запас современных знаний, можно значительно увеличить их чувствительность и постоянство.

Для определения плотностей газов необходимо кроме веса знать *объем*, а сверх всех известных поправок на объем в предстоящих исследованиях должно ввести точную поправку на изменение объема сосудов от разницы внутреннего и внешнего давлений. А что такое определение, даже при малом перевесе давления, необходимо, особенно для больших стеклянных шаров, так в этом я убедился многократно: если сосуд калибровать ртутью, то он дает больший объем, чем при определении его объема водою, и в доказательство того, что это зависит от большего давления ртути, чем воды, я неоднократно делал определение ртутью, погрузив сосуд в ванну из ртути же; тогда выходили числа те же, что и по воде, и если шар, наполненный ртутью, вынуть из ртутной ванны, то тотчас происходит падение уровня. [4] В тех исследованиях, где это обстоятельство не принято во внимание, есть устранимая погрешность в определении объемов. В предстоящих исследованиях поправку на изменение объема от давления должно определить с точностью, хотя и будут взяты сосуды толстостенные, так как и давле-

[1] Этот принцип, сколько мне известно, ввел в практику г. Саллерон в Париже.

[2] Считаю неизлишним прибавить здесь одну, повидимому, мелкую, но существенную техническую подробность устройства проектированных мною весов, которую желал бы видеть распространенною. В большинстве известных мне весов арретировка устроена так, что может при случайных потрясениях сама собою падать, а чрез то весы портятся. Чтобы избежать этого, я проектировал при ручке арретира такой зубчатый храповик, который при снятии ручки (а ручка арретира обыкновенно съемная) и даже при отсутствии давления на ее ручку закрепляет арретир так, что самопроизвольное его движение невозможно. Устройство такого храповика не затруднит ни одного механика, а между тем придаст весам надежность.

[3] Особенно интересно было бы изучить влияние так называемого трения, которое можно найти, определив m, P, l и наблюдая при данном p углы отклонения. Весьма важно узнать, как изменяется это трение с нагрузкою, материалом призм и т. п.

[4] Общеизвестная разность в показаниях стоящего и лежащего термометра зависит от той же причины, т. е. от расширения резервуара под давлением столба ртути.

ния будут велики. Должно будет при том так направить исследования, чтобы избежать пластических (остающихся) изменений объема сосудов, чтобы иметь дело только с упругими изменениями. Для этого сосуд, назначаемый для определений до известных давлений, надо подвергнуть давлению, бо́льшему, чем это предельное давление, потому что тогда меньшие давления произведут, как показывают опыты над упругостью разных материалов, [1] только одни упругие изменения формы. А чтобы определить эти последние, должно будет снабдить исследуемый сосуд калиброванною капиллярною трубкою, наполнить ртутью или водою и определять расширение сосуда от увеличенного внутри давления, что и можно будет сделать, измеряя положение жидкости в капиллярной трубке, принимая, конечно, все предосторожности для сохранения температуры. Зная сжимаемость жидкости, можно уже будет по результатам опыта определить и расширяемость сосуда. А для того, чтобы определить сжимаемость ртути и воды, я предполагаю произвести ряд исследований, которые соединю с определением сжимаемости газов. Эти исследования необходимы особенно потому, что существующие до сих пор определения ограничиваются малыми давлениями, а мне придется иметь дело с значительными, и еще потому, что, несмотря на обширность литературы о сжимаемости жидкостей, все еще нельзя считать решенным вопрос об изменении формы сосуда, на который производится давление со всех сторон, а от решения этого вопроса в ту или другую сторону [2] зависит и определение величины сжатия жидкостей. Для решения же этого вопроса я предполагаю сделать исследование над сплошными и полыми внутри каучуковыми шарами и сосудами.

Кроме изменения от давления емкость сосудов изменяется с температурою, и вопрос об этом изменении, особенно в комбинации с изменением от давления, весьма сложен, а потому, на первое время, я ограничусь определениями плотностей газов *при некоторой постоянной температуре*, близкой к обыкновенной. Чтобы определить ее, или правильнее, чтобы иметь возможность с точностью воспроизвести ее современем (когда принятый за норму термометр изменится или утратится), я считаю лучшим средством *при этой* самой *температуре* определить *плотность ртути по отношению к воде*, взятой при той же температуре. Такой прием я считаю самым простым и надежным для определения некоторой температуры, близкой к обыкновенной, потому что он допускает бо́льшую точность, [3] чем воздушный термометр, показания

[1] Эти данные сообщили мне М. Л. и В. Л. Кирпичевы.

[2] См. напр. Regnault, Relation I—429 и след.

[3] Так как коэффициенты расширения воды и ртути весьма различны при низких температурах и так как относительные веса определяются с значительною точностью, то этот способ и может служить для довольно точного определения температур. Считая погрешность в весе = 0,0001 и принимая объем сосуда около 500 кубических сантиметров, должно ждать (см. О соединении спирта с водою 1865, стр. 8), что погрешность в определении относительного веса будет менее 0,00001, а так как такая разность отвечает в промежутке от 0° до 10° разности температур в 0°,004 Ц., между 10° и 20° она отвечает 0°,02 Ц. Следовательно, предлагаемым способом можно установить температуру с точностью, большею, чем та, какую достигает воздушный термометр *при обыкновенных температурах.*

которого также зависят от свойств резервуара и трубок, как и показания ртутного термометра, хотя и в меньшей мере. Современем я думаю сличить показания воздушного термометра с теми данными для относительного веса ртути и воды, которыми сперва буду руководствоваться. Здесь уместно упомянуть, что при настоящем запасе данных нельзя считать достаточно точными ни определения Реньо [1] коэффициента расширения ртути, ни определения [2] расширения воды, потому что предел точности тех и других не велик. Так у Розетти встречаются в разных рядах наблюдений плотности воды различия в 0,00003, а такие разности в плотностях влекут за собой при пользовании ими значительные разности в результатах. Вопрос этот имеет особое значение при определении объемов сосудов и их коэффициента расширения,— в комбинации с известным несоответствием между килограммом и весом кубического дециметра воды [3] делает всякие абсолютные определения объемов и температур очень шаткими. Все вопросы об объемах, температурах и коэффициентах расширения, тесно связанные между собою, могут быть решены только новыми, более прямыми и точными, чем существующие, определениями коэффициентов расширения и относительных весов воды, ртути и воздуха. Лучшим способом для тщательного решения вопроса о расширении ртути и воды я считаю способ весовой. Не вдаюсь теперь в описание своих предположений этого рода, потому что думаю приступить к осуществлению их только после того, как кончу исследование об изменении плотностей газов с давлением.

Мне остается сказать еще о точных единицах мер, которые стану употреблять, и об определении влияния поверхности сосуда на плотность газа. Что касается первого вопроса, то я предполагаю избрать один килограмм за норму, с ним сличить все свои разновесы и определить его отношение к нормальному килограмму, по оригиналу или по копиям его. Что же касается до меры длины, то за норму я приму *метр*, который изготовлен для меня г. Брауэром. При устройстве его я держался того же способа, который не раз был уже выше указан и который состоит в употреблении трубчатых мерительных шкал. Метр мой сделан из тянутой (а не паянной) трубки из красной меди и его всегда можно, не вынимая из оправы, довести до условной температуры, при которой отношение его к истинному, прототипному парижскому метру должно быть определено особым сличением. Предполагаемая мною система трубчатых мер представляет в этом отношении удобства, каких не имеют общераспространенные сплошные меры. [4]

---

[1] Об этом предмете смотр. чрезвычайно интересную статью голландского ученого H. Bosscha в Poggendorffs Annalen, Ergänzungb. V—258.

[2] О соединении спирта с водою стр. 40. Новые данные принадлежат Розетти, Pogg. Annalen, Ergänzungb. V—258.

[3] См. Kupfer, Travaux de la commission pour fixer les mesures et les poids de l'Empire de Russie, T. II—415 и др.

[4] Вопрос о нормальных мерах и весах, ныне вновь поднятый, по справедливости заслуживает внимания и я думаю, что платина, употребленная во Франции для таких мер, наименее прилична для этой цели, потому что в ее чистоте, однородности и постоянстве (она гигроскопична, поглощает газы, мягка) ныне нет уверенности, а воспроизведение из нее копий дорого. Что касается до нормального метра

Что касается до способа определения *влияния поверхности сосудов на плотность газов*, то я думаю определить существование этого влияния и отчасти его меру, находя плотность газа при данном давлении и при изменяемом отношении между емкостью сосуда и поглощающею поверхностью. Пусть r есть радиус шара, емкость его $^4/_3\ \pi r^3$, а поверхность $4\ \pi r^2$, отношение их $= \frac{r}{3}$ и пусть вес вмещающегося газа при давлении h и при $t°$ будет $= p$, следовательно плотность $d = \frac{3p}{4\pi r^3}$, затем в этот шар вложатся проволоки или палочки, объем которых пусть будет v, а поверхность s, и пусть тогда вес газа будет при h и $t°$ равен p_1, плотность будет $= \frac{3p_1}{4\pi r^3 - 3v}$, если она окажется (при большом h) равною d, то сгущения нет или оно неощутимо слабо, если же наблюденная вновь плотность d_1 будет больше, чем d, то разность происходит от сгущения газа на поверхности s, а потому, умножая опыты и разнообразя их (употребляя вместо шара трубки), можно будет определить с некоторою точностью ту меру изменения плотности, которая зависит от влияния поверхности. Главное же, для точности

то мне кажется наиболее удобным делать его из трубок одного тягучего и однородного металла, при том чистого (а не из сплава) и дешевого, а такова и есть медь (еще лучше, повидимому, сталь), а потому она и избрана мною для нормального метра. Если бы мое предложение было принято, то при ожидаемой установке нового нормального метра было бы легко изготовить желаемое количество совершенно одинаковых мер. Трубчатую систему я предполагаю также употреблять и для компараторов и такая система может быть даже применена к винту делительных машин. Считаю необходимым сверх того упомянуть здесь о том, что *нормальные меры можно сделать так, чтобы их длина при всех температурах оставалась постоянною*. Для этого их должно сделать из двух металлов, имеющих разные коэффициенты расширения подобно уравнительному маятнику. Нижняя длинная линейка должна иметь малый коэффициент k, длину ее назовем L. На концах этой линейки должно положить две короткие линейки длиною l с большим коэффициентом расширения K. Наружные концы их должны быть скреплены с концами нижней линейки, а на ближних концах верхних линеек нанесутся черты, означающие неизменную длину D. Очевидно, что если при некоторой температуре $t° \ D = L - 2l$ и если при другой температуре $T°$, $D = L[(1 + K(T-t)] - 2l(1 + K(T-t)]$, то $\frac{L}{2l} = \frac{K}{k}$, а потому $L = D\ \frac{K}{K-k}$ и $l = D^1/_2\ \frac{k}{K-k}$. Если $K = 2\,k$ (напр., медь и стекло, алюминий и сталь, латунь и платина), то $L = 2\ D$ и $l = {}^1/_2 D$, а потому тогда для метра придется взять нижнюю линейку в 2 метра, а верхние в $^1/_2$ метра. Для копий однако лучше удержать медные трубки, тем более, что на них можно нанести и доли метра, а сличать их с нормальным метром можно при какой угодно температуре. Установка нормального метра, конечно, потребует особого рода опытов над избранными материалами. Указанным способом во всяком случае легко довести коэффициент расширения до всякого желаемого minimum или сделать $= 0$, ибо можно нанести на верхних линейках черты в таком месте, что их расстояние будет от нагревания сокращаться, а не увеличиваться, и это будет тогда когда l будет больше чем $D^1/_2\ \frac{k}{K-k}$. За лучшую комбинацию металлов я считаю литую сталь и серебро (если $D = 250$, то $L = 592$, $l = 171$), а для удобства обращения с нормальными мерами полагаю, что их должно делать не длинными, напр., в $^1/_2$ или $^1/_4$ метра, тем более, что точнейшие измерения чаще приходится делать на небольшой длине и температуру удержать в такой мере легче, чем в длинной.

[1] [В подлиннике опечатка: $4Pr^3$. *Прим. ред.*]

результата, условие, которое должно наблюдать и которое до сих пор исследователи сжимаемости газов не наблюдали, состоит в том, чтобы для наблюдений брать сосуды, близкие к шарам, а не трубчатые, так как в шаре мы имеем наименьшее отношение поверхности к емкости.

Другие, более полные и подробные опыты над сгущением газов на поверхностях разных тел, предполагает предпринять Ф. Ф. Петрушевский.

Д. Менделеев

Май 1872 года

С.-Петербург

Журнал Русского Химического Общества и Физического Общества 1873 г., отд. I, т. V, в. 5, стр. 188—189.

ВЫПИСКА

из протокола заседания Физического Общества

8-го марта 1873 г.

4) Д. И. Менделеев сообщил об устроенном им дифференциальном барометре. Прибор этот состоит из стеклянного, окруженного непроводниками, шара, имеющего $19\frac{1}{2}$ литров емкости, внутри которого помещен термометр; показания последнего точны до 0,01° С. Шар сообщен, с одной стороны, с высушивающим аппаратом, от которого может быть отделен чрез закрывание крана, а с другой с воздушным насосом и манометром. Жидкость этого манометра есть или масло, или тяжелые части керосина, которые легче, подвижнее и лучше смачивают стекло, чем масло. Изменение давления атмосферы измеряется главным образом чрез половину приращения высоты столба в манометре.

Журнал Русского Химического Общества и Физического Общества, 1873 г., т V, отд. I, в. 5, стр. 189.

ВЫПИСКА

из протокола заседания Физического Общества

8-го марта 1873 г.

4) Затем г. Менделеев сообщил об употребляемом им весьма удобном способе кипячения ртути в барометренных трубках

Журн. Русского Химического Общества и Физического Общества 1873 г., т. V, в. 6, отд. I, стр. 255—256.

ВЫПИСКА

из протокола заседания Физического Общества

10 мая 1873 г.

7) Г. Менделеев сообщил об устройстве, которое он дал своему дифференциальному барометру, который по своей чувствительности весьма пригоден для барометрического нивеллирования; в особенности замечательны две части этого усовершенствованного прибора: термометр, в котором вместо ртути служит ксилол, и капиллярная трубчатая проволока. Г. Менделеев находит, что ртуть по своему большому удельному весу невыгодна для термометра в двух отношениях: тяжестью своею она увеличивает емкость термометренного сосуда и, так как масса ее, при том же объеме, сравнительно с другими жидкостями велика, то термометр не скоро принимает температуру окружающей среды. Лучшими термометренными жидкостями могут служить, по мнению г. Менделеева, углеводороды и из числа таких он выбрал ксилол. В таком термометре необходимо оставлять над жидкостью немного воздуха, иначе столбик ее легко разрывается. Капиллярная проволочная трубка свернута спиралью внутри воздушного сосуда, в котором находится еще и сосуд термометра, а концы ее выходят из сосуда внаружу; пропуская чрез трубку холодную или теплую воду, можно придать желаемую температуру воздушному сосуду. Воздушный сосуд есть банка — 7—10 литров вместимости, имеющая два горла: одно вверху, другое внизу. Чрез верхнее горло сосуд соединен с манометром и высушивающими трубками, а чрез нижнее проходит трубка ксилолового термометра.

Журнал Русского Химического Общества и Физического Общества 1873 г., т. V, в. 6, отд. 1, стр. 296—301.

67. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ЗАМЕТКА ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ВЫСОТ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ БАРОМЕТРОМ

(Из лаборатории С. Петербургского Университета)

Изменение объема газа с переменою давления давно применяется для определения малых перемен барометрических высот. Для этой цели обыкновенно запирают некоторое количество газа столбом жидкости и о перемене давления судят по изменению высоты жидкости. Такое устройство прибора (с предосторожностями, необходимыми для достижения точного результата) применено было мною для определения изменения барометрических давлений при исследовании сжимаемости газов [1] и может быть приспособлено к нивеллированию, о чем я и хочу сообщить, хотя имею еще немного предварительных опытов с прибором, нарочно устроенным для этой последней цели.

Представим стеклянный сосуд в 5—20 литров емкостью с двумя горлами внизу и вверху, окруженный худыми проводниками тепла и наполненный сухим воздухом. Чрез одно горло идет трубка чувствительного термометра, [2] снабженного передвижною и закрепляющеюся шкалою с произвольными делениями. Конечно лучше для удобства обращения поставить трубку термометра сбоку сосуда, что достигнется, введя резервуар термометра чрез нижнее отверстие сосуда, загибая затем трубку термометра кверху. Чрез то же нижнее отверстие сосуда пропускается конец тонкой медной тянутой (как проволока) трубки, которая, изгибаясь внутри сосуда спиралью, выходит чрез верхнее его отверстие. Чрез эту трубку можно пропускать холодную или теплую воду и тем понижать или повышать температуру воздуха в сосуде до желаемой меры, о чем можно судить, во-первых, по стоянию термометра, а во-вторых по положению масла в манометре, сообщенном с сосудом, потому что наш прибор есть в то же время воздушный термометр. Чрез верхнее отверстие сосуда пропущены сверх того две тонкие трубки: одна снабжена краном, могущим сообщать или отделять наружный воздух от внутреннего. За краном помещена трубка с хлористым кальцием, чтобы входящий в сосуд воздух высушивался. Другая трубка сообщает сосуд с масляным манометром, прикрепленным сбоку сосуда и снабженным миллиметрическими делениями.

---

[1] О чем я сообщал в мартовском заседании Физического общества.

[2] По соображениям, которые я разовью впоследствии, для этой цели приличнее всего наполнять термометр углеводородами, высоко кипящими.

Масло берется нефтяное, то-есть состоящее из высоко кипящих частей нефти. Оно имеет плотность около 0,88, т. е. в 15,3 раза легче ртути и потому, если давление изменится так, что ртуть поднимется на 1 миллиметр, это масло поднимется около 15,3 миллиметров.

Применение этого прибора, называемого мною дифференциальным барометром, основывается на следующих простых соображениях.

Выразим давление атмосферы в граммах на квадратный сантиметр [1] и пусть в двух местах A и B, которых высоты различаются на h сантиметров, и притом B выше A, давление атмосферы будет H и H—x. Эта разность x зависит от того, что между A и B находится слой воздуха высотою h, и вес которого в граммах будет равен eh, где e есть средний вес куб. сант. воздуха в пространстве от A до B. Следовательно

I. $$x = eh, \text{ откуда } h = \frac{x}{e}$$

Величины x и e можно определять наблюдением, а потому можно узнать h. Величина x и определяется дифференциальным барометром. Запрем его кран в A[2], то-есть, при давлении H и перенесем в B, где давление H — x, представив сперва, что температура воздуха в сосуде не изменилась. По закону Мариотта имеем:

$$V \cdot H = \left[V + \frac{d}{2} w\right] \cdot (H - x + d \cdot \Delta),$$

где V есть объем воздуха, запертого в приборе, d есть поднятие уровня масла в манометре при переходе из A в B (в сантиметрах), w есть площадь сечения манометрической трубки и Δ вес куб. сантиметра масла (смотря по температуре различный). Отсюда

II. $$x = d\Delta + H\left(1 - \frac{1}{1 + \frac{d}{2} \cdot \frac{w}{V}}\right)$$

Если отношение $\frac{w}{V}$ мало, то-есть если сосуд велик, а манометрическая трубка тонка [3] и особенно, если d не велико ,что и будет при небольшом различии высот A и B, то II выражение превращается в более простое:

III. $$x = d\left[\Delta + \frac{H}{2} + \frac{w}{V}\right]$$

Если $\frac{w}{V}$ мало, то малые изменения в H не имеют влияния на результат и потому член $\frac{H}{2} \cdot \frac{w}{V}$ можно счесть постоянным. Его легко найти прямым измерением w и V или особым опытом, сравнив высоты

---

[1] Так, нормальное давление в 760 мм. ртути при 0° равно: 76·13,596 = 1033,296 гр. на кв. сантиметр.

[2] Тогда очевидно уровни масла в ветвях манометра будут одинаковы, то-есть, d = 0.

[3] Однако ее нельзя сделать тоньше 4—5 мм в диаметре, иначе будет погрешность от капиллярности — оттого надо брать сосуд большой.

масла при данном перевесе давления (произведенном искусственно — насосом) сперва при открытом кране (тогда найдется $d \cdot \Delta$), а потом при запертом кране (тогда найдется $d\Delta + \frac{dHw}{2V}$). Если, например, трубка манометра имеет диаметр 6 миллиметров, сосуда емкость 15 литров, то член $\frac{H}{2} \cdot \frac{w}{V}$ имеет значение 0,00974, если принять $H = 1033$, если же H будет $= 1000$, то он равен 0,00943. Значит там, где x велико и его требуется знать с точностью, должно знать и H, но если x не велико, напр. $= 1{,}2$ (что отвечает $h = 10$ метрам), то можно довольствоваться средним значением H и считать член $\frac{H}{2} \cdot \frac{w}{2}$ постоянным, что совершенно достаточно в пределах возможных погрешностей наблюдения.

Итак, x определяется из наблюдения разности высот масляного манометра при переходе из A в B. Но положение масла в манометре изменится также и при всякой перемене температуры, а потому надо во-первых, стараться по возможности устранить перемены температур прибора (для того окружить его худыми проводниками), а во-вторых, исправить показания манометра на происшедшее изменение температуры, что и достигается при помощи термометра и вышеописанной спиральной трубки. Пусть температура при переходе из A в B возвысилась. В A закрепим 0 (нуль) подвижной шкалы термометра у места стояния термометрической жидкости, в B оно будет выше, например, при делении $+n_1$,[1] и пусть тогда манометр показывает d_1. Пропустим чрез прибор холодную воду и пусть равновесие температуры (узнается по постоянству стояний термометра и манометра) настанет тогда, когда термометр показывает n_2, а манометр d_2. Требуется узнать, каково было бы показание манометра d, если бы термометр стоял на 0; мы это и узнаем простым интерполированием точным, если n_2[1] и n_2 не далеки от нуля. Если n_1 вообще мало отличается от 0, что и будет, когда A и B недалеко отстоят друг от друга, то предварительными опытами можно установить соотношение между изменениями термометра и манометра и исправить показания манометра по термометру. Или же в этом случае из B опять можно возвратиться в A и наблюсти вновь стояние термометра и манометра и найти необходимую поправку. Вообще же, так как наш прибор есть чувствительный воздушный термометр, то в нем всегда возможно исправить по закону Мариотта-Гэ-Люссака, показания манометра на температуру, [2] а потому показания манометра можно всегда перевести к одним и тем же температурам.

Затем необходимо узнать e, т. е. вес куб. сантиметра воздуха. Эта величина находится, как известно, наблюдая давление, температуру и влажность в A и B и взявши среднее значение из определений в двух крайних пунктах. Если h не велико, достаточно знать в одном пункте, при том можно ограничиться или только наблюдением одной

[1] [В подлиннике опечатка: *n*. *Прим. ред.*]

[2] Большая чувствительность такого воздушного термометра заставляет меня думать, что он будет очень удобен для калориметрических определений.

температуры, или наблюдением ее и гигрометра, или наблюдением давления и температуры, что часто будет достаточно в пределе погрешности определений. Можно также прямо взвешивать воздух, как описано в моем сочинении «О соединении спирта с водою» (1865) стр. 65, причем, взявши шар емкостью в 10 литров и взвешивая с точностью до дециграмма (что легко произвести на дешевых весах), получим[1] e с точностью до 0,00001 грамма.

Подставляя в I значение x по III, имеем:

$$h = \frac{d}{e}\left[\Delta + \frac{H}{2}\,\frac{w}{V}\right],$$

где требуется наблюдать d и e, а множитель [в квадратных скобках], величина заранее известная, близкая к 0,89, если взято нефтяное масло и большой сосуд. Так как e близко к 0,0012, то $h = d \cdot 742$, т. е. изменение уровня в манометре на 1 сантиметр отвечает поднятию на высоту 742 сантиметров. А так как можно еще ясно видеть изменение уровня масла на $^1/_{10}$ миллиметра, то можно определять высоты, превышающие друг друга не более как на 7,5 сантиметра, что достаточно для многих случаев нивеллирования. При картографических работах, предварительных съемках, при проведении дорог, при геологических исследованиях, при возведении водяных сооружений (запруд, канав и пр.) и во многих подобных случаях, особенно там, где обыкновенное нивеллирование затрудняется лесом, болотами, холмами и тому подобными препятствиями и где при том ртутный барометр, дающий ясные показания только при разности высот в 100—200 сантиметров — там дифференциальный барометр может быть пригоден к делу.

Если в d мы сделаем погрешность a, а в определении e погрешность b, то погрешность в h будет $= \left[\frac{a}{e} + \frac{b}{e}\,h\right] 0{,}89$. Погрешность в d надо принять 0,01, потому что сотые доли миллиметра уже наблюдают с трудом, погрешность в e, то-есть, b надо принять, если произведено полное определение давления, температуры и влажности, не менее 0,000002, а потому погрешность в определении высоты будет $7{,}4 + 0{,}0015\,h$ сантиметров, откуда очевидно, что при высотах в 1—10 метров погрешность будет 7,5—8,9 сантиметра, при высотах в 50—100 метров она достигает 15—22 сантиметров, при высотах в 300—400 метров будет уже около 60 сантиметров.

Вот пределы точности, до которых можно достичь при нивеллировании дифференциальным барометром. Известно, что ртутный барометр дает гораздо большую погрешность.

Когда идет дело о сравнении высот двух отдаленных пунктов, то конечно и здесь, как при других гипсометрических определениях, должно произвести ряд единовременных наблюдений на обоих пунктах. При определении высот значительных гор, конечно, должно предпочесть обыкновенный барометр дифференциальному, а потому в карто-

---

[1] [В подлиннике напечатано получил. *Прим. ред.*]

графических работах в горных местностях должно ждать наилучшего результата от соединения определений при помощи обоих родов барометра.

Май 1873 г.

PS. Устройство дифференциального барометра можно улучшить, если всегда приводить запертый воздух к одному и тому же объему, при помощи такого же приема, какой употребляется в воздушных термометрах. Тогда чувствительность не зависит от объема и тогда можно сделать сосуд малым, а следовательно можно взять металлический сосуд и погрузить его в особую водяную ванну, которой температура может регулироваться при помощи показаний термометра и манометра. Тогда разность давлений в двух местах (x) определится прямо произведением из наблюденной высоты масляного манометра (d) на плотность масла (Δ), а следовательно и чувствительность прибора возрастет. По этим причинам я думаю остановиться именно на этом видоизменении дифференциального барометра; впрочем предполагаю испытать и несколько других форм.

14-го мая.

ВЫСОТОМЕР
или
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ БАРОМЕТР ДЛЯ НИВЕЛЛИРОВАНИЯ,

устроенный профессором С.-Петербургского университета

Д. И. Менделеевым

и

продающийся в магазине физических и химических
приборов Рихтера,
в С.-Петербурге, на Адмиралтейской площади,
подле Невского проспекта

Санктпетербург
Типография Императорской Академии Наук
(В. О. 9 л. № 12)
1875

Дозволено цензурой. С.-Петербург
14 июня 1875 года.

Действие дифференциального барометра профессора Д. И. Менделеева основано на упругости воздуха, запираемого краном (который назовем далее чрез *r*) в резервуаре, помещенном внутри сосуда с водою. Воздушный резервуар прибора сообщается с манометром, в котором налито нефтяное масло. Если наружная ветвь этого манометра открыта, то в момент затвора крана *r*, при резервуаре находящегося, уровни нефтяного масла в обеих ветвях манометра находятся на одной высоте. Если затем атмосферное давление изменится, например от поднятия или опускания прибора на высоту нескольких футов, то вследствие большей упругости запертого или наружного воздуха, уровни нефтяного масла в ветвях манометра изменятся. По разности уровней масла в обеих ветвях манометра можно судить о происшедшем изменении давления, а потому и о мере поднятия, или опускания прибора и следовательно о высоте места. Так как нефть (приблизительно) в 16 раз легче ртути, то отчет на дифференциальном барометре яснее, чем на ртутном в 16 раз. А так как пружина воздуха вполне совершенна и хорошо известна и воздух в приборе постоянно возобновляется (при открытии крана *r*), то здесь не может быть таких неправильных изменений, какие возможны и случаются с анероидными барометрами, действие которых основано на упругости металлов.

Основные начала устройства прибора, разные случаи его применения, а особенно применение прибора для нивеллирования, способ расчета данных и описание различных форм прибора и другие данные для дифференциального барометра изложены профессором Менделеевым в его сочинении «*Об упругости газов*» ч. I, 1875 . *

Ныне, под наблюдением профессора Д. И. Менделеева, устраиваются приборы, назначенные для нивеллирования и названные *высотомерами*. В продаже имеется три рода таких приборов.

а) Простые высотомеры, назначаемые как учебное пособие при объяснении изменения упругости воздуха с изменением высоты места. Весьма поучительно видеть и высотомером быстро можно показать это изменение, потому что, заперев кран (*r*) прибора на полу и подняв его потом на высоту человеческого роста, уже замечается изменение уровней нефти, отвечающее двум миллиметрическим делениям шкалы. При поднятии во второй этаж обыкновенного размера, смотря по высоте его, разность уровней достигает от 4-х до 7-ми делений. Прибор

---

* Сочинение это продается в *Книжном магазине для иногородних* г. Наденна и в *Оптическом магазине* О. Рихтера. Цена 7 рублей.

этот может служить также для объяснения изменения упругости воздуха с переменою его температуры, для определения коэффициента расширения газов и т. п., ибо упругость воздуха изменяется с температурою. Он может быть применяем для нивеллирования в поле, если к нему присовокупить чувствительный ртутный термометр. Размеры прибора не много менее, чем следующего за сим.

b) **Сложный высотомер** назначается для практического нивеллирования при сельско-хозяйственных работах (при отводе воды, при устройстве запруд, съемке местностей для определения возвышений, для дренирования и т. п.), при проведении железных и других путей сообщения, при горных и особенно подземных исследованиях, при картографических и тому подобных работах. Хотя при помощи высотомера нельзя достичь той степени точности (до дюйма) нивеллирования, какая достижима при так называемой инструментальной (нивеллирами) съемке, ибо высотомер дает возможность определить разность высот с точностью до фута, но за то при употреблении высотомера можно весьма быстро нивеллировать на большие расстояния и не требуется проведения просек, обхода препятствий (зданий, болот и т. п.), заграждающих возможность применения обыкновенных нивеллиров. Сложный высотомер имеет размеры около 6-ти вершков высоты и около 3-х в диаметре, весит (наполненный водою) около 13 фунтов, а потому есть прибор легко переносный. Если в нем запереть два передних винтовых крана: правый (главный *r*, приводящий воздух в резервуар и идущий от трубки с хлористым кальцием, назначенным для сушения воздуха) и левый (запирающий сообщение другой ветви манометра с наружным воздухом), а также термометрический кран (отверстие для него находится на крышке прибора), [1] то прибор может быть безопасно опрокинут. [2] Стеклянные части в приборе находятся только снаружи сосуда, содержащего воду, и закрываются особою металлическою дверцею, а внутренние части все металлические, и потому прибор безопасен от поломки. Все его части по возможности приспособлены для прочности и легкости практического применения. [3] В этом сложном высотомере, кроме воздушного резервуара с манометром и кранами, имеются внутри сосуда с водою еще две существенные части: мешалка и дифференциальный термометр. Пред каждым наблюдением, равно как и пред запором правого крана (*r*), ведущего к воздушному резервуару, необходимо несколько раз поднять мешалку, дабы сделать равномерною

---

[1] Все три крана запираются одним общим ключем, при поворачивании его по направлению часовой стрелки. Один обратный поворот достаточен для открытия крана.

[2] Конечно лучше этого избегать, а при отправке, где перевертывание прибора возможно, должно сверх указанного запереть пробками отверстия термометра. Свободный конец термометрической трубки обыкновенно запирается малою пробкою не только для того, чтобы в термометр не входила пыль, но и для того, чтобы, при легком надавливании на эту пробку, можно было понижать по произволу уровень нефти в термометре в момент его запирания.

[3] Профессор Менделеев просит лиц, применяющих его прибор, адресовать к нему заявления новых практических требований, если таковые встретятся на деле.

температуру воды сосуда. [1] Термометр прибора есть дифференциальный нефтяной. Основное начало устройства такого термометра, недавно изобретенного профессором Д. И. Менделеевым, изложено в *Журнале Русского Химического и Физического Общества* за 1875 год, стр. 61. Когда запирается кран (*r*) воздушного резервуара, должно запереть и кран термометра и отсчитать положение в нем нефти по особой шкале. Если затем возвысится или понизится температура запертого воздуха, то малейшие ее изменения покажутся термометром, ибо он очень чувствителен, а потому окончательный результат наблюдения может быть освобожден от влияния переменной температуры воздуха. Для этой цели, предварительно или после наблюдений, должно узнать, заперев краны воздушного резервуара и термометра и искусственно нагревая прибор (вливая в сосуд немного холодной или горячей воды), сколько делений манометра отвечает наблюденному изменению температуры. При быстром переходе с одного места на другое, к нему близкое, когда прибор уже принял температуру окружающего воздуха и предохранен от солнечного нагревания (суконною или тому подобною покрышкою), температурные изменения будут очень малы, но они *могут быть* значительными, если переход от одного места до другого велик. Тогда лучше всего искусственно нагреть или охладить прибор приблизительно до прежде бывшей температуры, чтобы температурная поправка опять была незначительна. Если расстояние, на коем производится нивеллирование, значительно, то необходимо также принять во внимание перемены атмосферного давления, совершающиеся в течение времени, для чего должно на некотором месте на особом неподвижном сложном приборе следить за изменениями атмосферного давления, а потому тогда должно иметь два прибора для работы: один переносный, другой остающийся на одном месте. Если же расстояния, подвергаемые нивеллированию, столь невелики, что к начальному месту (где *r* заперт), можно возвратиться не более как в 20—30 минут, то можно довольствоваться одним прибором и по возвращении на исходное место определить происшедшее изменение в атмосферном давлении. Все другие необходимые для нивеллирования теоретические и практические подробности, равно как и способ расчета, будут изложены в особой, приготовляемой профессором Д. И. Менделеевым брошюре, а ныне указаны в вышеупомянутом его сочинении «Об упругости газов».

c) Третий род высотометров может быть назван **карманным**, потому что размеры его суть: высота около $2^1/_2$, диаметр около $1^1/_2$ вершков. Этот небольшой медный прибор снабжен дифференциальным термометром и обыкновенным ртутным (деления по Цельзию), как и сложный *b*. Он вкладывается в особый прочный кожаный футляр с ремнем чрез плечо, а потому с удобством может служить при путешествиях

[1] При начале ряда наблюдений необходимо дать время прибору принять температуру окружающего воздуха, чтобы затем не было быстрых ее перемен. Для этого при конце ряда наблюдений (например, в вечеру) лучше вылить (сифоном) воду из сосуда, а при начале (например, утром) влить такую, которая стояла на воздухе, иначе при переносе прибора из комнаты на воздух должно будет долго ждать (особенно осенью и весною) уравнения его температуры.

в случае, когда требуется прибор особенно портативный. Чувствительность его такая же, как и двух предшествующих, что может быть ясно видно из того, что слабые склоны на железных дорогах при его помощи легко определяются, сидя в вагоне.

Так как на каждую сажень поднятия или опущения уровень нефтяного масла в высотомерах изменяется приблизительно на 2,5 миллиметрических деления шкалы и так как приборы *a* и *b* имеют шкалу длиною около 175 миллиметров, то этими приборами можно сразу измерять поднятие или опускание около на 70 сажень. Прибором *c* достигается определение только при высоте не более 35 сажен. Если измеряемые высоты более указанных, то необходимо определение их произвести по частям.

После прекращения работы с прибором, должно или отпереть краны прибора, или (в том случае, когда правый кран желают оставить запертым) запереть левый кран в сложном приборе, потому что иначе при могущем произойти со временем значительном возвышении атмосферного давления, или при понижении температуры — нефть из манометра может проникнуть в воздушный резервуар. Если это случится, нефть должно возобновить. Если от неосторожного обращения в манометрической или термометрической трубках произойдет разрыв столбиков нефти воздушными пузырьками, их легко удалить — или слабым нагреванием того места, где замечается разрыв, и встряхиванием, или подогреванием воды в сосуде до того, чтобы нефть из трубок частью поднялась в соответственное верхнее расширение трубок.

Каждый прибор, испытанный относительно прочности и правильности устройства, снабжается подписью профессора Д. И. Менделеева и имеет соответственный нумер.

Добавочные и запасные части высотомера [1] могут быть выписываемы отдельно.

Высотомеры профессора Д. И. Менделеева продаются в магазине О. Рихтера, по следующим ценам:

а) *Простой высотомер* (без термометров), смотря по устройству (с одним или двумя кранами и т. п.) и отделке . . . . . от 25 до 40 руб.

б) *Сложный высотомер* с дифференциальным (нефтяным) и ртутным термометрами . . . . . 60 руб.

с) *Карманный высотомер* с такими же термометрами в кожаном футляре с ремнем через плечо . . . . . 85 руб.

С. Петербург
Июнь 1875 года.

---

[1] Собрание всех приборов для разных случаев нивеллирования высотомерами, с присоединением запасных частей, изготовляется и скоро поступит в продажу. Такое собрание содержит: 2 сложных высотомера, треногу для установки высотомера в поле, особую штангу для поднятия высотомера на высоту одной сажени, ящик с приборами для определения плотности воздуха (в нем: анероид с таблицею поправок и чувствительные выверенные ртутные термометры для определения температуры и влажности воздуха — эти приборы необходимы тогда, когда измеряемые высоты велики и требуется их знать с точностью) и ящик с добавочными и запасными частями (в нем: лупа для ясного отчета, запасные шкалы, нефть, мастика, манометрические и термометрические трубки, каучуковые трубки и т. п.). Это собрание составляется таким образом, чтобы в отдаленном крае наблюдатель, при помощи особого наставления, сам мог вполне изучить прибор и исправить могущие случиться с ним повреждения. Лица, желающие получить такое полное собрание приборов, или вышеупомянутые части, к ним относящиеся, должны заранее о том известить. Ценность полного собрания еще точно не определилась, но будет не более 250 рублей (без пересылки).

Журнал Русского Химического Общества и Физического Общества 1871 г., *т. VI, отд. I, вып. 1, стр. 7.*

ВЫПИСКА

из протокола заседания Химического Общества

13 декабря 1873 г.

1. Д. Менделеев сообщил наблюдения над разрывом стеклянных трубок, испытанных им для устройства манометра, назначенного для измерения сжимаемости газов при высоких давлениях. Оказалось, противу ожидания, что заказанные и особо изготовленные трубки, равно как и обыкновенные продажные, при том же наружном диаметре (от 12,5 до 11,4 мм) разрываются от внутреннего давления (производимого гидравлическим насосом) тем легче, чем дальше отступают от известной толщины стен, так что и более толстостенные и менее толстостенные рвутся легче, чем при некоторой наивыгоднейшей толщине. Так совершенно чистые трубки с толщиною стенок в 3—4 мм разрываются под давлением от 100 до 140 атмосфер, а при толщине стенок в 3—1,9 мм при давлении от 140—200 атмосфер. Для разрыва же растяжением требуется вообще около 400 килограммов на квадратный сантиметр сечения. Пузырьки и другие видимые неоднородности стекла весьма значительно уменьшают сопротивление стекла разрыву давлением изнутри. Разрыв всегда происходит продольными трещинами, часто сопровождаемыми мелкими трещинами в виде елочки, а если есть пузырек, то всегда разрыв происходит трещиною, проходящею чрез пузырек. Менделеев объясняет полученные им факты натяжением, существующим в массе стекла, увеличивающимся с толщиною. Особый опыт убедил его, что при трубках малой толщины стен закалка и быстрое охлаждение не изменяют сопротивления разрыву, что указывает на то, что натяжение в массе стекла образуется при самом переходе из мягкого в твердое состояние и всего вероятнее, что на поверхности стекла происходит уплотнение, а внутри массы натяжение.

Журнал Русского Химического Общества и Физического Общества 1874 г., т. VI, отд. I, вып. 1, стр. 8.

ВЫПИСКА

из протокола заседания Химического Общества

13 декабря 1873 г.

2. Д. Менделеев сообщил о необходимости и пользе для точных научных исследований принятия метрической системы измерения температур. Так как воздушный термометр есть единственный абсолютно согласный и постоянный термометр и так как наши градусные выражения всегда должны быть к нему относимы, то от него и должно взять меру градуса. Если будет взят некоторый объем водорода при температуре таяния льда и при нормальном давлении (для коего лучше бы принять давление 1000 гр. на кв. сантиметр, чем 760 мм ртутного столба), то метрическим градусом должно назвать такое повышение температуры, которое увеличивает упругость водорода на некоторую метрическую меру, например на 1 мм ртутного столба (норм. давл. = 760 мм.) или на 1 грамм на кв. сант. (при норм. давл. 1000 гр. на кв. сант.). В первом случае метрический градус = 0,3590° Ц, а во втором = 0,2728° Ц. Такая система измерения температур не только облегчает все расчеты с газами и отвечает механической теории их, но и доставляет возможность очень простого и точного измерения температур при помощи измененных Менделеевым воздушных термометров. Для определения обыкновенных температур, точное определение которых особенно важно во всех калориметрических и физических исследованиях, М. устроил и показал Обществу нефтяной воздушный термометр, в котором одному градусу Ц. отвечает столб нефти [1] около 42 мм., что дает возможность легко с помощью катетометра определить тысячные доли градуса. Для определения изменений в давлении и поправок рядом с этим термометром помещается другой, запаянный единовременно с первым и во всем ему подобный, помещаемый в тающем льде. М. выразил, показывая свой прибор, что при его помощи, действительно [2] можно измерять число градусов метром. Для точного и скорого определения более высоких температур М. предложил такой водородный термометр, в котором упругость газа, запертого при нормальном давлении, меряется прямо барометром, что делает определение температур гораздо более точным, чем при упо-

[1] Для этого термометра, как и для дифференциального барометра, могущего служить для нивеллирования (Ж. Р. Х. О., 5 (1) 269), М. берет часть бакинской нефти, не содержащую парафина и перегоняющуюся выше 300°, уд. вес ее при 20°, 0,86.

[2] [Сохранена пунктуация подлинника. *Прим. ред.*]

треблении обыкновенного воздушного термометра. Воздушный термометр Мендел. употреблял только для сличения и поправки, но постоянной и частой, обыкновенных ртутных термометров, которые он калибрует особым способом и отчитывает при самом опыте особою трубою с окулярным микрометром и значительным увеличением. Такая труба дает возможность при помощи обыкновенного химического термометра, деленного на градусы, делать скорый и точный отчет постоянных температур до сотых долей, а в термометрах, изготовленных для М. Гейслером (в Бонне), деленных на $^1/_{50}°$ Ц, легко и точно отчитываются тысячные доли градуса, до которых можно произвести сличение водородным нефтяным термометром.

Журнал Русского Химического Общества и Физического Общества 1874 г., отд. 1, т. VI, часть физ., отд. 1, вып. 1, стр. 10—12.

ВЫПИСКА

из протокола 14-го очередного собрания Физического Общества при Императорском С.-Петербургском Университете

20 декабря 1873 года

6. Д. И. Менделеев сообщает о том, что сделано им, по поводу его работы над упругостью газов, для точного определения температур. Рассматривая ныне употребляемые системы определения температур, где две точки определяются таянием льда и кипением воды, а подразделения — воздушным термометром, г. Менделеев указал на то, что такая система не только затрудняет все термометрические определения, но и делает их мало точными и сомнительными. Поэтому г. Менделеев предлагает, по крайней мере для чисто научных работ, новую «м е т р и ч е с к у ю» систему определения температур. Приняв водород под давлением в 1000 граммов на кв. сантиметр при температуре таяния льда за исходную точку, должно назвать метрическим градусом $\left(\frac{o}{m}\right)$ [1] такое повышение температуры, которое увеличивает упругость этого газа на 1 грамм на кв. сантиметр площади. При этой системе облегчаются все расчеты с газами, избегается другая точка (кипения воды) нынешних систем и термометрия вводится в общую для измерений метрическую систему. Практическое значение предлагаемой системы очевидно для точного определения обыкновенных температур, что особенно важно при точных физических определениях и особенно в калориметрии. Для определения температуры, значит, необходимо в сосуде, помещенном в тающем льде, запереть при некотором давлении, близком к давлению 1000 граммов на кв. сант., газ жидкостью и, введя затем сосуд в ванну с определяемою температурою, определить упругость запертого газа, когда он занимает тот же объем, как и во льду; это давление, выраженное в граммах на кв. сант., даст число метрических градусов. Так как запирающая жидкость может быть легка, то малые изменения температуры будут производить значительные, ясные и всегда (помимо калибрования) равные изменения высот манометрической жидкости. Взяв нефтяное масло, которое в 15,8 раз при 20° легче ртути при 0°, получим на каждый градус Цельсия изменение высоты масла в манометре около 42 миллиметров, а потому не только сотые, но и тысячные доли 1° Ц определяются легко. Г. Менделеев показывает устроенный им первый прибор этого рода, где два таких сосуда: оба запаяны единовременно тогда, когда были во льду, и один остается

[1] Один градус Цельсия = 3,667 такого метрического градуса; $0°Ц = 1000\,\frac{o}{m}$; $100°Ц = 1366{,}7\,\frac{o}{m}$ (Возможны и другие метрические системы температур.).

во льду, другой же служит термометром. При таком устройстве, изменения в барометрическом давлении от времени запаивания до времени наблюдения прямо даются прибором и устраняются или упрощаются все поправки.

Затем г. Менделеев описывает устройство ртутного водородного термометра, в котором можно достичь точности, по крайней мере вдвое большей, чем в употребляемых ныне воздушных термометрах, потому что устраняется отчитывание барометра, так как в этом приборе самый воздушный термометр имеет одну ветвь манометра, устроенную как барометр.

Таким образом облегчается и делается более точным применение воздушного термометра, но не исключается необходимость ртутного термометра по его удобству применения. Впрочем, нет нужды ни устанавливать постоянные точки, ни основываться на каких-либо допущениях при употреблении ртутного термометра, потому что всегда легко его будет сличить с водородным. Однако калибрование и точное отчитывание необходимы для того, чтобы, при помощи ртутного термометра, можно было судить о малых изменениях температур.

Для точного отчитывания температур ртутных термометров г. Менделеев употребляет особо устроенную трубу с нивеллирною установкою с значительным увеличением и с микрометром, дающим возможность следить за изменением температуры и получать точные подразделения. Поэтому в обыкновенных термометрах, деленных только на целые градусы, легко и точно отчитываются сотые; а на таких термометрах (от Гейслера в Бонне), которых градус делен на 50 частей, можно читать и определять и 10-ти тысячные доли градуса Ц. Для устранения закрытия мениска чертами и уменьшения ошибок делений г. Менделеев устраивает термометры с очень тонкими и короткими делениями, отстоящими друг от друга на 2—5 миллиметров, потому что микрометр дозволяет делать подразделения и отчеты и при таком расстоянии. Такой отчет дозволяет сокращать длину точных термометров, что важно в практическом отношении, особенно для постоянства термометров. Г. Менделеев считает, что из других систем устройство термометров системы Гейслера в Бонне наиболее способно дать инструменты совершенные, принимая во внимание легкую возможность сравнения с водородным термометром.

Наконец г. Менделеев описывает свой способ калибрования трубок, состоящий в проведении малой капли, в отчитывании положения ее концов микрометрами и в расчете по этим данным площадей сечения трубки в разных местах. Расчет этот основан на допущении кривизны трубки и составляет приближение второго порядка, если обычные методы дают приближение первого порядка. Г. Менделеев принимает, что на пространстве, где сделано n (например, три) наблюдений, сечения удовлетворяют параболе $(n-1)$ того порядка (например, второго) и потому, интегрируя, выводит площадь сечения для каждого места трубки в зависимости от наблюденных длин, а по площадям сечений определяется уже калибр и поправки термометрической или другой трубки.

Журнал Русского Химического Общества и Физического общества 1874 г., т. VI, часть физ., отд. I, вып. 4, стр. 72—73.

ВЫПИСКА

из протокола 17-го Очередного заседания Физического Общества при Императорском С.-Петербургском Университете

5 марта 1874 г.

6) Д. И. Менделеев сообщает от имени своего и М. Л. Кирпичева о сделанных ими, в течение двух лет, наблюдениях над сжимаемостью воздуха под давлениями, меньшими атмосферного. Наблюдения делались в разных приборах, чтобы убедиться в точности вывода. Объем газа выражался весом вылитой ртути, который был, в последних опытах, от 1000 до 45000 граммов. Он исправлен на сжимаемость сосуда, на температуру газа и на гири. Газ запирался особым ртутным запором, и температуры наблюдения были: 17,°5 ± 0,°020 С. Упругость измерялась особо устроенным бароманометром с постоянным уровнем. Поправки наблюденных высот делались на: упругость газов торичеллиевой пустоты, температуру ртути и температуру шкалы, с которою производилась компарация. Результаты всех наблюдений, сделанных до сих пор от 650 мм. до 0,5 мм. давления, суть: 1) Закон Бойля-Мариотта не только не удовлетворяется при малых давлениях, но даже 2) отступления от него становятся все большими по мере уменьшения давления. 3) Произведение PV (давление на объем) с возрастанием давления от 0,5 до 650 мм. возрастает для воздуха, примерно от 100 до 150, а не уменьшается, как то выходит из наблюдений Реньо для давлений выше атмосферного. 4) Замеченные отступления выше возможных погрешностей наблюдения; так, например, нет такой поправки наблюденных давлений, которая могла бы оправдать Мариоттов закон.

Наблюдения, находящиеся в связи с предпринятою работою над сжимаемостью газов, продолжаются с другими газами и при других давлениях. Причиною продолжительности наблюдений была неожиданность полученного результата, идущего в разрез с тем господствующим предположением, что по мере уменьшения давления газы приближаются к совершенному состоянию. Результат первых опытов оттого и проверялся новыми способами и будет проверяться еще вновь устроенными приборами. Средства для исследования отпущены Русским Техническим Обществом.

Журнал Русского Химического Общества и Физического Общества 1874 г., т. VI [часть хим.], отд. I, вып. 4, стр. 124—125.

ВЫПИСКА

из протокола заседания Химического Общества

7 марта 1874 года

4) Д. Менделеев сообщил от имени своего и М. Кирпичева об сделанных ими исследованиях над упругостью разреженного воздуха, причем описал прибор и привел следующие результаты: 1) произведение из объема на давление (P · V), долженствующее по закону Бойль-Мариотта быть постоянным, не становится таким от 650 мм. до 0,5 мм.; 2) это произведение (P · V) по мере уменьшения давления все быстрее и быстрее изменяется в противоречии с гипотезою о совершенном газе; 3) произведение это (P · V) с возрастанием давления от 0,5 мм. до 650 мм. возрастает, а не уменьшается, как видно по исследованиям Реньо для воздуха при давлениях выше атмосферного.

Bulletin de l'Académie Imperiale des Sciences de St. Pétersbourg, т. 19, 469—475, 1874.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ЗАМЕТКА ОБ УПРУГОСТИ РАЗРЯЖЕННОГО ВОЗДУХА[1]

гг. Д. Менделеева и М. Кирпичева

(Прочтено 9 апреля 1874) [2]

После того, как было выяснено, что закон Бойля-Мариотта не выражает точным образом отношения между упругостью и объемом газа, пришли к гипотезе, что реальные газы приближаются к состоянию совершенного газа, которое должно полностью соответствовать этому закону, по мере уменьшения их упругости. Эта гипотеза до настоящего времени не была обоснована никакими сколько-нибудь точными экспериментальными данными. [3] Соответственно проекту изучения сжимаемости газов, который был изложен одним из нас два года тому назад [4], мы произвели ряд наблюдений над вполне осушенным [5] воздухом, при давлениях, меньших атмосферного давления. Усовершенствования, которые мы вносили втечение двух лет в наши методы наблюдений, и совпадение результатов, полученных в различных сериях опытов, дают нам право утверждать, что, начиная от давлений в 650 мм. ртути до 0,5 мм., воздух не только не следует закону Бойля-Мариотта, но отклоняется от него все больше и больше по мере уменьшения его плотности. Придя к полной уверенности в этом отношении, мы хотим дать здесь краткое описание наших методов наблюдений, подробности которых будут изложены в отчете, имеющем быть представленным председателю Русского технического общества Г. П. К о ч у-

---

[1] Notice préliminaire sur l'élasticité de l'air raréfié.

[2] Рецензенты, назначенные Императорской Академией Наук (г. г. З и н и н и В и л ь д) для рассмотрения заметки г.г. М е н д е л е е в а и К и р п и ч е в а, представили в заседании 9-го апреля доклад, в котором они заявляют, что, хотя ни чтение этой заметки, ни ознакомление с применявшимся в опытах прибором не позволили им вынести суждение относительно точности законов, указываемых авторами, как результат их исследований, они все же рекомендуют напечатать эту заметку в Бюллетене — во всяком случае под ответственностью авторов за ее содержание.

[3] Г. Р е н ь о (Relations etc., т. 1, 139) сделал три наблюдения (300—360 мм.), но он сам признает, что они содержат различные источники ошибок, как в самом деле видно из сравнения этих результатов с нашими. Г. Р е н ь о в указанных наблюдениях не принял во внимание сжатия сосудов.

[4] Д. М е н д е л е е в. Артиллерийский журнал 1872, август. Журнал Русск. Хим. Общества, 1872, март, стр. 102 и стр. 309.

[5] Для этой осушки применялась система трубок, содержащих KHO, H^2SO^4 и P^2O^5.

б е ю ввиду того, что опыты над сжимаемостью газов были предприняты благодаря средствам, предоставленным в наше распоряжение чрез посредство этого общества, и благодаря участию, которое принял в этом вопросе его императорское высочество великий князь К о н с т а н т и н Н и к о л а е в и ч.

Опыты, которые мы сейчас сообщаем, были сделаны при помощи стеклянного сосуда (A) яйцевидной формы, помещенного в банку с водою и могущего вмещать почти 45 кг ртути. К нижней части этого сосуда (A) была припаяна трубка, длиною в один метр и снабженная краном (B). Вес ртути, которую выпускают из сосуда (A), дает объем, занятый воздухом. Над выпускным краном (B) прикреплена боковая трубка также с краном, сообщающаяся с резервуаром с ртутью и служащая для наполнения сосуда (A). Специальные опыты убедили нас, что при введении ртути в сосуд (A) не происходит увлечения воздуха и что предосторожности, которые мы предприняли с этою целью, пуская ртуть медленно чрез нижнюю часть сосуда, достигали своей цели. Верхняя часть яйцевидного сосуда (A) заканчивается поднимающейся вверх капиллярной трубкой (C), выступающей из водяной бани; по делениям, нанесенным на этой трубке, можно судить, наполнен ли сосуд (A) ртутью и насколько его объем изменился от изменения давления. Эта направленная вверх капиллярная трубка (C) сообщается с двумя трубками (D) и (E), направленными вниз. Первая из этих трубок (D) служит затвором и заменяет кран при введении газа в прибор. С этой целью ее нижний конец окружен более широкою трубкою, которая соединена герметически с осушивающим прибором; в этой трубке можно по желанию поднимать и опускать уровень ртути. При опускании уровня ртути нижний конец капиллярной трубки (D) становится свободным и сосуд (A) приходит в сообщение с воздухом, проходящим чрез осушивающий прибор. Наоборот, если поднять уровень ртути, то она закрывает конец трубки (D) и запирает воздух в сосуде (A); это приспособление действует, следовательно, как кран, представляя некоторые преимущества пред ним. Во время наблюдений доводят ртуть в трубке (D), служащей затвором, до заранее отмеченной черты. Вторая опускающаяся капиллярная трубка (E) служит для соединения яйцеобразного сосуда с сифонным бароманометром, служащим для определения давлений. Этот бароманометр состоит из двух трубок диаметром в 20 мм., что позволяет избегать поправки на капилярность; одна из этих двух трубок есть барометр в 1200 мм. высотою. В другой трубке, образующей второе ответвление, можно всегда установить ртуть очень точно на том же самом уровне, при помощи специального приспособления. Метод, которым мы пользовались для наполнения барометра ртутью и для определения поправки, зависящей от упругости воздуха, остающегося в пустоте, будет описан в подробном мемуаре. Отметим здесь только, что самая большая из этих поправок (при 650 мм. давления) была равна 0,14 мм. и что при малых давлениях она не превышает 0,04 мм. Манометрическая ветвь этого прибора была калибрирована и мы нашли, что объем, занятый воздухом, между уровнем, до которого была доведена ртуть в манометре, чертою на

трубке, служащей затвором (D), и на трубке опускающегося вниз капилляра (C), [1] соответствовал в большинстве опытов 30 гр. ртути. Что же касается объема воздуха, с которого начинался опыт, то он никогда не было меньше 1000 гр. ртути, так что самый малый из наблюдавшихся объемов соответствовал 1 килограмму, а самый большой — 45 килограммам. Во взвешивания вводились поправки и они производились с точностью до 0,01 гр. Температура главной массы воздуха (в сосуде A) поддерживалась равною 17°,500 и измерялась специальным термометром, помещенным в ванне и разделенным на 50-ые доли градуса. Для малых изменений температуры, не превосходящих 0°,020, делали поправку объемов. Поправку вводили также на температуру воздуха, который находился в манометре.

Чтобы дать пример величины всех поправок объемов, мы приводим данные одного из наших опытов — опыта 10 февраля.

	Вес ртути, вытекшей из крана (B), исправленный на вес разновесок	Поправка на сжатие (A), происходящее от вытекания ртути	Поправка на изменение объема (A), вызванное изменением давления	Объем воздуха вне сосуда (A)	Термометрическая поправка на объем воздуха		Объем воздуха при температуре в 17°,5
					в сосуде (A)	вне сосуда (A)	
1)	998,57	−1,27	—	+30,02	−0,01	−0,02	1027,29
3)	338,62	−1,30	−1,03	+29,92	−0,04	−0,01	1364,73
2))	1833,83	−1,42	−2,89	+29,30	−0,09	−0,03	3195.89
45)	1064,11	−1,51	−3,24	+28,82	−0,31	−0,05	4258,84
6)	2058 01	−1,54	−3,57	+28,85	−0,09	−0,04	6315,75
7)	6452.02	−1,74	−3,92	+29,74	+0,00	−0,04	12769 20
8)	26552.93	−2,04	−4,14	+28,87	+0,00	−0,05	39320.71
	4704,29	−2,06	−4,17	+29,64	+9,11	−0,03	44034,87

Гр. ртути при 17°,5

Мы наблюдали давления на бароманометре, о котором мы говорили выше, и выражали их в миллиметрах столба ртути при температуре 17°,5. Определения производились по способу сравнения с калиброванным эталоном метра, который был сравнен г. Т р е с к а и одним из нас с нормальным метром, находящимся в Парижской Conservatoire des arts et metiers. Для сравнения мы пользовались катетометром П. Б р а у е р а, измененным таким образом, чтобы иметь возможность делать поправки на центрировку уровня и микрометра. [2] Мы ввели также поправки на температуру ртути, температуру метра, равно как и на упругость воздуха, который находился в барометрической пустоте. Вот таблица наблюденных давлений, соответствующих наблюдениям объемов, упоминавшихся выше.

[1] [Переведено буквально, хотя и не вполне ясно, что хотели сказать авторы. *Прим. ред.*]

[2] Желаемая точность наблюдений положения мениска достигалась проектированием его изображения на стеклянный матовый шар осветительной лампы.

	Давление в миллиметрах, исправленное на уровень, микрометр и температуру метра	Поправка на температуру ртути, приведенной к 17°,5	Поправка на упругость воздуха в пустоте	Исправленные давления в миллиметрах при 17°,5	Произведение давления на объем, приведенный к [значению] 646,19 [принятому] за 1
1	646,065	—0,02	+0,140	646,185	1,00000
2	486,15	—0,01	+0,075	486,215	0,99960
3	207,39	—0,01	+0,050	207,430	0,99867
4	155,615	—0,015	+0,045	155,645	0,99856
5	104,77	—0 005	+0,040	104,805	0,99730
6	51,59	—0,005	+0,040	51,628	0,99306
7	16,36	—	+0,035	16,395	0,97114
8	14 52	—	+0,035	14,555	0,96551

После каждой серии опытов мы оставляли разреженный воздух в приборе до следующего дня или на несколько дней — до следующего опыта; таким образом мы могли убедиться, что прибор держит пустоту абсолютно, потому что давления не изменялись, когда возвращались к первоначальной температуре. Степень точности наблюдений зависит главным образом от тщательности определения давлений, и мы считаем ее не ниже 0,02 мм. в каждом отдельном опыте и выше, чем 0,02 мм., во всей серии, потому что отчет при малых давлениях производился при помощи микрометренного окуляра, одно деление которого соответствует 0,0044 мм.

Чтобы судить о степени точности в определении малых давлений, мы приводим еще один пример:

Исправленный объем ртути в гр.	Давление, измеренное по метру	Давление, измеренное микрометром	Поправка на пустоту	Среднее исправленное давление	Произведение объема на давление
20813	1,989 1,972	1,979 1,979	+0,037	2,017	41980 или 1,000
42893	0,868 0,824	0,872 0,824 2-й день 0,838 4-й день	+0,037	0,882	37732 или 0,899

Совокупность наших наблюдений приводит нас к следующим заключениям:

1) Произведения объемов на давления, которые по закону Бойля-Мариотта должны бы были быть постоянными, не постоянны для воздуха и меняются значительно, когда давления изменяются от 650 до 0,5 мм.

2) Произведения давлений на объемы, которые по гипотезе совершенных газов должны бы были приближаться к постоянной величине, наоборот изменяются все более и более быстро для воздуха, когда давления уменьшаются от 650 до 0,5 мм.

3) Отклонения от закона Бойля-Мариотта для воздуха при малых давлениях падают в обратную сторону (с увеличением давлений произведение возрастает, т. е. $\frac{d(PV)}{d(P)}$ [1] положительно, по сравнению с тем, что указывают данные Ренью для воздуха, при давлениях выше атмосферного (с возрастанием давлений произведение уменьшается, т. е. $\frac{d(PV)}{d(P)}$ [1] — отрицательно).

4) Величина отклонений, которую мы наблюдали, значительно превышает возможные ошибки наблюдений.

5) Природа отклонений, которые мы наблюдали, такова, что, если имеет место конденсация газов на поверхности сосудов, то она увеличит значение отклонения и сделает результат еще более ясно выраженным.

Мы ограничимся этими заключениями, которые, в конце концов, мы считаем предварительными, потому что мы продолжаем наши опыты с другими газами по новым методам и при различных давлениях, более высоких и более низких, чем те, о которых мы здесь говорили.

[В подлиннике опечатка: $\frac{P \cdot V}{d(P)}$ *Прим. ред.*].

Журнал Русского Химического Общества и Физического Общества 1874 г., т. VI, часть физ., отд. I, вып. 5, стр. 84.

ВЫПИСКА

из протокола 18-го очередного заседания Физического Общества при Императорском С.-Петербургском Университете

8-го Апреля 1874 года.

5) Д. Менделеев показывает два дифференциальных барометра, приспособленных для нивеллирования: [1] один простейший и малый с зажимным краном, а другой полный с двумя кранами и приспособлением для измерения температуры ванны, в которой погружен воздушный резервуар. Оба прибора устроены так, чтобы при изменении давления можно было производить наблюдения при равных объемах запертого воздуха. При нивеллировании для определения плотности воздуха можно употреблять тот же самый прибор; для этого, подняв его на определенную высоту (например, 2 метра), должно запереть кран, опустить прибор и наблюсти разность высот нефтяного масла в манометре. Наблюдения этого рода могут служить для определения переменной плотности воздуха и в других случаях, например, при взвешивании, при гипсометрических определениях ртутным барометром и т. п.

---

[1] См. Журнал Русского Химического Общества и Физического Общества 1873 года, том V, стр. 296—301 [= 175 — 179].

Журнал Русского Химического Общества и Физического Общества 1874 г., т. VI, часть физ., отд. I, вып. 5, стр. 84—85.

ВЫПИСКА

из протокола 18-го очередного заседания Физического Общества при Императорском С.-Петербургском Университете

8-го Апреля 1874 года

6) Д. И. Менделеев показывает новый вид устройства ртутного барометра. Это есть сифонный барометр, снабженный в нижней ветви кранами для приливания и выливания ртути, а в верхней ветви капиллярною трубкою, которая направлена книзу, имеет барометрическую длину и загнута, как сифонный барометр. Таким образом имеются два сифонных барометра, соединенные вверху с общею пустотою: один, состоящий из широкой, другой из тонкой трубки. Главные выгоды такого устройства суть: 1) барометр наполняется в своем естественном положении, без обычного перевертывания, приливая в короткую ветвь широкого сифона сухую ртуть и выкачивая из тонкой трубки воздух насосом. [1] 2) Подливая ртуть (чрез кран нижней ветви), можно довести ее стояние до верху, тогда она будет переливаться чрез узкую трубку, унесет с собою (вытеснит) остаток воздуха и паров, как в насосе Шпренгеля. 3) Слив затем из короткой ветви широкой трубки часть ртути, получим барометр, который можно прокипятить, при чем кипячение будет производиться в пустоте, а выкипяченный газ и пар можно вытеснить чрез узкую трубку. 4) Во всякое время можно вновь произвести, не трогая барометра с места, вытеснение и новое прокипячение. 5) Так как после спуска части ртути получается два барометра: один в широком, другой в узком барометре, а между ними торичеллиева пустота, то, соединив ртуть нижних ветвей обоих сифонных барометров с проводниками от румкорфовой спирали, можно узнать степень электропроводности пустого пространства. Это дает возможность убедиться не только в постоянстве показаний барометра, но и в степени совершенства пустоты, имеющейся в нем, [2] для чего по настоящее время имеется только одно средство, основанное на приложении мариоттова закона к газу, содержащемуся в торичеллиевой пустоте. Закон же этот может быть (см. протокол 17-го заседания 5-го марта 1874 года) и при самых малых давлениях не применим к газам, как не применим он от 650 до 0,5 мм. давления. Г. Менделеев продолжает

[1] При отсутствии насоса, например, в путешествиях, этого же можно достичь, увеличивая высоту столба ртути в короткой ветви сифона.

[2] Исследования Моррена показывают, что, начиная от 1 мм. упругости до 0, электропроводность газов очень быстро и правильно уменьшается.

начатые им исследования с новым барометром, потому что он испытал многие другие способы изготовления нормальных барометров [1] и находит вышеописанный способ не только легчайшим, но и наиболее точным, ибо, убедившись в несовершенстве прибора, можно с уверенностью улучшать его, а остановившись на известной степени близости его показаний к абсолютным, можно всегда легко убедиться в том, сохранилась ли данная степень совершенства показаний или изменилась.

---

[1] По поводу производимых им исследований над сжимаемостью газов.

Журнал Русского Химического и Физического Общества 1874 г., т. VI [часть хим.], отд. I, вып. 6, стр. 175—176.

ВЫПИСКА

из протокола заседания Химического Общества

2-го мая 1874 г.

5. Д. Менделеев сообщил об устроенном им при помощи Ф. Капустина ртутном насосе, не имеющем ни кранов, ни клапанов и действующем быстро при малых количествах ртути и основанном на образовании барометрической пустоты при подъеме и опускании сосуда с ртутью, как в насосах Гейслера, Морена, Джауля,[1] Лачинова.[2] Принцип устройства тот же, как и в барометре, о котором Менделеев сообщил в апрельском заседании Физического общества. Резервуар, в 100—200 куб. сант. емкости, постепенно переходит кверху в нисходящую, тонкую (в 2 мм) трубку, нижний конец которой погружен в сосуд с ртутью. Нижняя часть резервуара кончается широкою (в 6—7 мм.) трубкою, снабженною близ резервуара тонкою восходящею трубкою. На нижнем конце широкой трубки надета каучуковая трубка и на ней укреплен открытый сосуд для ртути, как в других упомянутых насосах. Все 4 трубки (две узких и одна широкая стеклянные и одна каучуковая) имеют длину больше барометрической. Тонкая восходящая трубка соединяется с пространством, из которого производится выкачивание, и с манометром. При подъеме сосуда (на высоту барометра + + высоту резервуара) с ртутью, она восходит в восходящей трубке и резервуаре и вытесняет чрез тонкую нисходящую трубку воздух резервуара. При опускании сосуда, ртуть падает в восходящей трубке, образует барометр в нисходящей трубке, и в резервуаре образуется пустота, в которую и входит чрез восходящую трубку воздух, потому что место сообщения восходящей и широкой трубок при опускании сосуда открывается, ибо оно сделано выше барометрической высоты, считая от нижнего положения сосуда. Устройство этого насоса так просто, что его легко сделать самому, особенно производя скрепления отдельных трубок мастикою; по малости количества ртути, этот насос доступен при небольших затратах, действие же его быстро и дает возможность достичь (при употреблении сухой, чистой ртути и при чистоте резервуара, каучука и трубок) до давлений, меньших тех, которые меряются ртутным манометром. В этом отношении описанный насос равняется Шпренгелеву, но действует несравненно быстрее этого последнего. Предлагаемый насос малых размеров может с удобством применяться не только для обыкновенных выкачиваний, но и при анализе и вообще при работах с газами, потому что представляет пипету, подобную Дойеровой, служащую для перемещения газов.

[1] Chem. News. **29**, 89.
[2] Ж. Р. Х. О. (физическая часть) **6**, (1) 17.

Журнал Русского Химического Общества и Физического Общества 1874 г., т. VI, часть физ., отд. I, вып. 6, стр. 106 и 120.

ВЫПИСКА

из протокола 19-го заседания Физического Общества

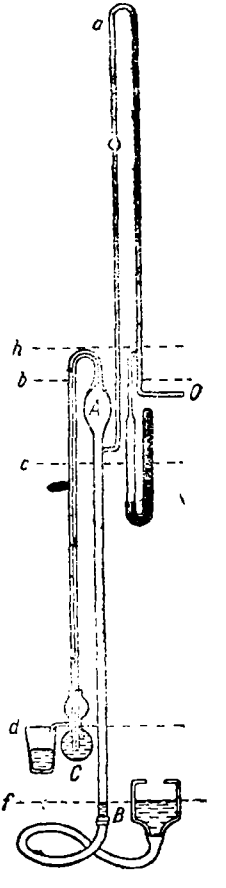
7-го мая 1874 г.

стр. 106

6) Д. И. Менделеев представляет Обществу устроенный им ртутный насос, не имеющий ни вредного пространства, ни трений, ни кранов, ни клапанов. [1]

стр. 120.

Описание насоса, устроенного Д. И. Менделеевым



Насос этот действует подобно насосам Гейсслера, Моррена, Жолли и др. Основанием для устройства служило начало, примененное Д. И. Менделеевым к барометрам, [2] т. е. от верхней части резервуара A, куда при подъеме сосуда с ртутью B входит эта последняя, идет вниз тонкая трубка, погруженная в сосуд C, кончающаяся ниже постоянного уровня d ртути в нем и имеющая длину более барометрической (разность высот уровней b и d = = 780 мм), чрез нее-то и выбрасывается воздух из резервуара A. При опускании сосуда B в образовавшуюся пустоту резервуара A входит воздух чрез трубку, припаянную ниже резервуара; эта трубка, идущая вверх к a, имеет высоту более барометрической (разность высот уровней a и h равна 780 мм,) и в ней, при подъеме сосуда B со ртутью, эта последняя поднимается на высоту, сообразную степени разрежения воздуха. Когда сосуд B находится в нижнем своем положении и лежит на подставке, не представленной на чертеже, тогда уровень f ртути в нем ниже уровня c на 780 мм. O — отверстие трубки, идущей к тому сосуду, из которого выкачивают воздух.

Действие прибора такое же совершенно, как и насоса Шпренгеля, но несравненно быстрее. Емкость резервуара A может быть весьма небольшою, а вместе с этим объем и вес ртути сосуда B могут быть не велики, что облегчает процесс разрежения воздуха, состоящий в попеременном поднятии и опускании сосуда B.

---

[1] Схематический чертеж и описание насоса находятся в настоящем выпуске.

[2] См. протокол 18 заседания Физическ. Общества, выпуск 5-ый, 1874 г.

Журнал Русского Химического Общества и Физического Общества 1874 г., т. VI [часть хим.], отд. I, вып. 7, стр. 209.

ВЫПИСКА

из протокола заседания Химического общества

12-го сентября 1874 г.

5. Д. Менделеев сообщил о том, что несогласие выводов, достигнутых Зильештремом [1] и тех, которые сделаны Менделеевым и Кирпичевым [2] относительно сжимаемости разреженного воздуха зависит не только от несовершенства его способов наблюдения, но и от неверности в разборе данных, добытых Зильештремом. При правильном расчете вывод из этих данных (вообще нестройных и малоточных, что признается и самим Зильештремом) подтверждает вывод Менделеева и Кирпичева, показывая, что воздух (и другие газы) при малых давлениях отступают в иную сторону, чем воздух при высших давлениях по Реньо.

---

[1] Pogg. Ann. April u. Mai 1874.
[2] Ж. Р. Х. О. 6 (1) 124.

Журнал Русского Химического Общества и Физического Общества 1874 г., т. VI, часть физ., отд. I, вып. 7, стр. 122.

ВЫПИСКА

из протокола 20-го заседания Физического Общества при Императорском С.-Петербургском Университете

17-го сентября 1874 года

5) Д. И. Менделеев сообщает замечания на исследования Зильетрема над упругостью разряженных газов.[1]

[1] Статья помещена в настоящей книжке [=206—210].

Журнал Русского Химического Общества и Физического Общества 1874 г., т. VI, часть физ. отд. 1, вып. 7, стр. 126—131.

ОБ ОПЫТАХ ЗИЛЬЕШТРЁМА НАД УПРУГОСТЬЮ РАЗРЕЖЕННЫХ ГАЗОВ[1]

В апрельском и майском (1874) выпусках Анналов Поггендорфа Зильештрём (Siljeström) описал свои предварительные опыты над упругостью разреженных газов, особенно воздуха, и вывел (р. 580), что воздух (и другие газы) при малой упругости (в 7—770 мм.) представляет такие же отступления от Мариоттова закона, какие Реньо нашел для него при более значительных давлениях (1—30 атмосфер). Вывод этот прямо противоречит тому (Bulletin de l'Ac. de Sc. de S. Petersb. T. IX, 466 [=194—198]), какой нашел я и Кирпичев после продолжительной работы, о чем сообщили в мартовском заседании Физического общества и Русск. Хим. Общества (Жур. Р. Х. Об. 1874. I—124=193 и II, 72=192)[2]. Мы нашли для воздуха, что «отступления от Бойль-Мариоттова закона при малых (0,5—650 мм.) давлениях идут в другую сторону (с увеличением давления произведение из объема V на давление P увеличивается, то-есть $\frac{d(VP)}{d(P)}$ есть величина положительная > 0), чем те, какие нашел Реньо для давлений выше атмосферного (ибо у него $\frac{d(VP)}{d(P)} < 0$). Наш вывод согласуется с теми соображениями о природе газов, которые были ранее того развиты мною[3], а именно показывает, что при разрежении газов (если найденную законность распространить на самые малые давления) достигается некоторый наибольший, предельный объем, подобно тому, как газ достигает некоторого предельного, наименьшего объема при сжатии, а потому нельзя утверждать, что газ при разрежении переходит в световой эфир и что у земной атмосферы нет границы. Разреженный газ, так сказать, подобен твердому телу.

---

[1] Настоящая работа была напечатана в переводе на немецкий язык в Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft, 7, 1339—1344, 1874, под заглавием «Ueber Siljeström's Versuche zur Ermittelung der Dichtigkeitsänderungen verdünnter Gase» (Eingegangen am 20. September.).

[2] Подробный отчет о произведенных мною опытах над (сжимаемостью) упругостью газов, в виде отчета председателю И. Русского Технич. Общества, чрез посредство коего получены средства для производства опытов, печатается и будет выходить по частям.

[3] Журн. Русск. Хим. Общ. 1872, 102 [=126—127. В подлиннике опечатка: 809. *Прим. ред.*].

Различие выводов, достигнутых Зильештрёмом и нами, можно было бы объяснить несовершенством опытных приемов Зильештрёма,[1] неполнотою расчета полученных им данных[2] и запутанностью результатов его наблюдений,[3] что видит и сам автор и чего нет в наших последних наблюдениях (l. c.), после которых мы ныне еще более стремимся усовершенствовать методы наблюдения. Но помимо этих причин есть одна главная, совершенно уничтожающая вывод З—ма и заставляющая признать наш вывод. Дело в том, что из опытов г. Зильештрёма м о ж н о, при всем их несовершенстве, извлечь т о л ь к о н а ш вывод, хотя из столь нестройных данных, какие дал З—м и н е д о л ж н о делать в сущности никакого вывода. Для доказательства высказанного здесь необходимо объяснить методу наблюдения З—ма, но предварительно считаю полезным ясно поставить вопрос, подлежащий решению.

Если закон Мариотта справедлив, то произведение PV (объем на давление) есть величина постоянная (при той же температуре и массе газа), которую мы примем здесь за 1. Если закон этот несправедлив, то PV будет изменяться с переменою давления и, в данных пределах давлений, это изменение может быть выражено или так:

$$(N) \qquad PV = 1 - aP,$$

как выражается[4] сжимаемость воздуха по данным Реньо от 1 до 22 метров давления, или же

$$(H) \qquad PV = 1 + aP,$$

как, по опытам Реньо, выражается сжимаемость водорода при значительных давлениях. Вопрос состоит в том: как выражается сжимаемость воздуха при малых давлениях, по (N), как это утверждает Зильештрём, или по (H), как нашли я и Кирпичев? Важные последствия для понятия о природе газов от решения в ту или другую сторону этого вопроса столь очевидны, что я не считаю нужным на них здесь останавливаться.

Для своих опытов Зильештрём взял два металлических сосуда A и B, объемом V и V′. Они соединены трубкою с краном. Сперва, при запертом кране, в A оставляется воздух под упругостью E, а из B выка-

---

[1] Сам Зиль—м в своей статье многократно указывает на это. Так, у него манометр очень тонок (диаметр 4,8 мм.), барометр не достаточно выверен, ртуть не чиста, для измерений не было катетометра и др.

[2] Нет поправки на температуру воздуха вне ванны (в манометре и трубках) находящегося, нет поправки на сжимаемость сосуда и др.

[3] Сам г. Зильештрём признает (стр. 579), что абсолютным его числам доверять нельзя и что отдельные многочисленные ряды не представляют правильности.

[4] Так, опыты Реньо с воздухом до 8—10 метров выражаются довольно хорошо, приняв $a = 0{,}0015$, но еще лучше, полагая $= 0{,}001965 - 0{,}0000982\,P$. Величину a вообще должно считать функциею P. Так, по нашим опытам, для малых давлений a есть величина, быстро меняющаяся при перемене давления от 0,5 до 650 мм.

чивается воздух.[1] Затем кран отворяется и определяется упругость E′ воздуха, занимающего теперь объем V + V′. Если закон Мариотта был справедлив, то при всех давлениях и газах

$$VE = (V + V')E',$$

а потому было бы

$$\frac{E}{E'} = \frac{V + V'}{V}.$$

При отступлениях от закона Мариотта отношение $\frac{E'}{E}$ (после поправки) или больше, или меньше постоянной $\frac{V + V'}{V}$. Действительное значение $\frac{V + V'}{V}$ Зильештрём нашел = 1,4686, а для высших (от 770 до 350 мм.) давлений отношение $\frac{E}{E'}$, найденное Зильештрёмом,[2] было: для воздуха 1,4721, для кислорода 1,4726, для углекислоты 1,4695 и для водорода 1,4725. Для всех газов наблюдение дало $\frac{E}{E'}$ больше наблюденного $\frac{V + V'}{V}$. Из этого можно вывести, что отступления от Мариоттова закона при разряжении газов выражаются формулою (H), а не (N). Действительно из (H) следует, что

$$V : E'(V + V') = 1 + aE : 1 + aE'.$$

Отсюда определяя $\frac{E}{E'}$, разлагая в строку и пренебрегая величинами второго порядка (по отношению к малой величине a), получаем:

$$\frac{E}{E'} = \frac{V + V'}{V}\left[1 + aE\frac{V + V'}{V'}\right].$$

Так как величина $\frac{V'}{V + V'} > 0$, то по (H) следует, что $\frac{E}{E'}$ будет больше $\frac{V + V'}{V}$, как и получил З—м. Следовательно, выражение (H), а не (N) приложимо к газам, подвергнутым расширению чрез уменьшение давления.

Автор (стр. 580, строка 4-я) думает однако, что данное им (1,4686) значение $\frac{V + V'}{V}$ не верно и должно быть гораздо более, а потому

---

[1] В действительности, в B оставался воздух под упругостью от 1 до 2 мм., но результат освобожден поправкою от этого усложняющего обстоятельства. Оно делает всю методу Зильештрёма непригодною для точных опытов, ибо по ней предварительно требуется знать изменение упругости при малых давлениях.

[2] Г. Зильештрём находимое по опыту (и исправленное) значение $\frac{E}{E'}$ везде обозначает чрез $\frac{V + V'}{V}$, и потому, может быть, считает за отношение объемов. Я думаю, что от этой причины происходит ошибочность его суждений. Иначе я не могу ее объяснить.

из прямого сравнения $\frac{E}{E'}$ с $\frac{V+V'}{V}$ вывода делать не следует, а сравнивать можно только $\frac{E}{E'}$, полученные при разных давлениях. В этом отношении Зильештрём пришел к тому заключению, что для воздуха и других газов с уменьшением давления, значения $\frac{E}{E'}$ постепенно уменьшаются (p. 549, § 13). Этот вывод, однако, далеко не общий, для чего достаточно сличить для воздуха числа от 37 до 18 мм. $\left(\frac{E}{E'} = 1{,}4612\right)$ с теми, которые в среднем получены для давлений от 18 до 7 мм. $\left(\frac{E}{E'} = 1{,}4651\right)$, а для других газов все средние числа, расположенные здесь по уменьшающимся давлениям:

для кислорода:	1,4726;	1,4702;	1,4715;	1,4671.
для углекислоты:	1,4695;	1,4711;	1,4701;	1,4711.
для водорода:	1,4725;	1,4730;	1,4726;	1,4689.

Допустив однако, вместе с З—м, что с уменьшением давления, значения $\frac{E}{E'}$ всегда уменьшаются, мы тем самым подтвердим наш (H) вывод и опровергнем вывод (N) автора. Действительно формула I, основанная на (H), показывает, что, с уменьшением E значение $\frac{E}{E'}$ уменьшается. Если же допустить формулу (N), то по ней

$$\frac{E}{E'} = \frac{V+V'}{V'} - aE\frac{V'}{V}$$

с уменьшением E отношение $\frac{E}{E'}$ должно было бы увеличиваться, ибо вычитаемое тогда становится меньше.

Введя все возможные поправки[1] в данные Зильештрёма для воздуха, определяя по ним PV, взяв затем средние величины и приняв PV около 760 мм. за 1000, я получил следующий средний результат, [2] для коего определил вероятную погрешность Δ(PV):

Давление:	760	450	200	100	45	25	15 мм.
PV	1000	997,4	992,1	991	990	996	998
Δ (PV)	—	± 0,1	± 0,4	± 1,0	± 2,6	± 5,0	± 10,0

Значительность вероятной погрешности среднего результата этих данных показывает, что их значение для решения вопроса о сжимае-

[1] А именно, исправляя значение PV на температуру (10^{-5}) частей прибора, вне льда находящихся.

[2] Для примера привожу данные для высших давлений 16-го ряда наблюдений З—ма. Приняв при 777,7 мм. PV = 1, получаем (по данным стр. 481 и 482) для P = 529,2, PV = 9969; для P = 360,2, PV = 9941; для P = 245,5, PV =

мости газов весьма мало; данные же для давлений ниже 25 мм. вовсе не могут служить для этой цели. Наиболее точные результаты, полученные для давлений в 760—50 мм., прямо показывают, что для воздуха под малыми давлениями с возрастанием давления значения PV возрастают, то-есть, они подтверждают вывод мой и Кирпичева, опровергая вывод Зильештрёма.

Итак:

1) Опыты Зильештрёма, особенно при малых (ниже 50 мм.) давлениях, заключают такую погрешность, что по ним нельзя с уверенностью определить даже рода (H или N) сжимаемости газов, а потому все суждения, помещенные З—м в §§ 14, 15 и 17, лишены фактической опоры.

2) Правильный разбор совокупности данных З—ма для давлений выше 100 мм. утверждает вывод (H), сделанный мною и Кирпичевым, и прямо противоречит выводу (N) З—ма.

3) Способ наблюдения, употребленный З—мом, сходный с тем, какой применил Реньо (массы и объемы газов переменны), представляет то существенное несовершенство, что в результат данного наблюдения входят погрешности всех предшествовавших (начиная от исходного давления) наблюдений, а потому погрешность в PV весьма быстро возрастает, начиная от исходного давления.

Считаю необходимым заметить, что опыты с другими газами, чем воздух, и при других давлениях чем 0,5—650 мм., мною и Кирпичевым продолжаются, и к ним присоединены, для полноты решения вопроса об упругости газов, наблюдения над определением расширения от нагревания газов под разными давлениями.

Август, 1874.

= 9920 и т. д. Средние числа можно получить также из средних данных стр. 577 и 578, потому что там даны $\frac{E}{E'}$, а $P_0V_0 : PV = 1000 : \frac{V + V'}{V} \cdot \frac{E'}{E}$.

Журнал Русского Химического и Физического Общества, 1874 г., т. VI, [часть хим.], отд. I, вып. 7, стр. 208—209.

ВЫПИСКА

из протокола заседания Химического Общества

12-го сентября 1874 г.

4. Д. Менделеев сообщил общую формулу для газов, основанную на совокупности законов Мариотта, Гэ-Люссака и Авогадро (Ампера-Герара).

$$Y = \frac{M(C+T)}{PVAi},$$

где M есть масса (вес в миллиграммах), T — температура, P — давление (в метрах ртутного столба), V — объем (в литрах), Ai — частичный вес ($H = 1$, для смесей находится средний частичный вес, например, для воздуха $Ai = 28{,}836$), $C = \frac{1}{a}$ — величина почти постоянная, близкая к 273, наконец, Y есть величина также постоянная и близкая к 16000. Формула эта полнее и общее известной формулы $PV = K(C + T)$ Клапейрона и может иметь много применений при исследовании паров и газов. Она оправдывается существующими данными и показывает, что при отступлениях от одного из законов (Мариотта, Гэ-Люссака или Ампера) еще может быть справедливой совокупность этих законов, как это вытекает из сравнения некоторых наблюдений Реньо над отступлениями от законов Мариотта и Гэ-Люссака. В некоторых случаях предшествующую формулу удобнее выразить:

$$M = \frac{PV}{62\,(273 + T)}\,Ai,$$

где буквы имеют то же значение, только M выражено в килограммах. Так, например, по этой формуле легко вычисляется вес M (в килограммах) литра ($V = 1$) какого-нибудь газа или пара при данных давлении и температуре, частичный вес (Ai), отвечающий наблюдаемому весу (M) при данных объеме, давлении и температуре, что упрощает расчет при нахождении частичной формулы и т. п.

Журнал Русского Химического Общества и Физического Общества 1874 г., т. VI, часть физ., отд. I, вып. 7, стр. 121—122.

ВЫПИСКА

из протокола 20-го заседания Физического Общества при Императорском С.-Петербургском Университете

17-го сентября 1874 года

Д. И. Менделеев сообщает об общей формуле для газов, обозначив через:

M — вес газа в килограммах,

T — температуру его по Цельзию,

P — упругость его в метрах ртутного столба при 0°,

V — объем его в литрах,

A — частичный вес газа, приняв атомный вес водорода равным единице, из совокупности законов Мариотта (Бойля), Ге-Люссака и Авогадро (Ампера, Жерара), имеем для всех газов (и паров вдали от температуры кипения):

$$APV = KM(C + T),$$

где K и C суть постоянные, первая близка к 62°,[1] вторая к 273°.

Формула эта — общнее известной формулы Клапейрона

$$PV = R(C + T),$$

ибо в последней R изменяется с природою и массою газа, а здесь K постоянна для всех газов. Эта формула упрощает все приближенные расчеты, относящиеся до газов и паров, когда можно допустить точную применимость трех названных законов.

Принимая же во внимание существование отступлений от этих законов, при помощи этой формулы можно в абсолютной мере выражать эти отступления, найдя зависимость K и C от давления, температуры и частичного веса газов. Из существующих наблюдений, с одной стороны, оказывается, что для разных газов, с увеличением K, C уменьшается, а с другой, что при изменении давления от 1 до 5 атмосфер C уменьшается (для воздуха от 273 до 270), но тогда и K возрастает, а потому закон Ге-Люссака представляет бо́льшие отступления, чем два других закона, управляющие газами. По этой причине г. Менделеев предполагает присоединить к своим исследованиям над упругостью газов определение их коэффициента расширения при постоянном давлении. Для этой цели он устроил прибор, в коем прямо коэффициенты расширений определяются весом ртути почти без всяких других поправок и представляется возможность сделать определения этого рода более точными, чем те, при коих коэффициенты расширения выводятся из отношения давлений.

---

[1] $\frac{1}{K} = 0{,}016$, т. е. при абсолютной температуре 1° (= — 272° C), при давлении 1 метра, один литр газа, коего частичный вес = 1, весит 16 граммов, т. килограмм его занимает объем в 62 литра.

Журнал Русского Химического Общества и Физического Общества 1875 г., т. VII [часть хим.]. отд. I, вып. 4, стр. 145—147.

ВЫПИСКА

из протокола заседания Химического Общества

6 Марта 1875 г.

Д. Менделеев сообщил о скончавшемся члене Русского Химического Общества Михаиле Львовиче Кирпичеве следующее:

«Потеря Михаила Львовича глубоко поразила всех его знавших по той симпатии, какую внушали его личные качества и его научные таланты, обещавшие уже с самого начала его деятельности замечательного ученого. Михаил Львович родился в 1847 г. в Псковской губернии. Первым образованием он воспользовался от матери и от отца, бывшего преподавателя математики в Инженерном училище. Математические способности Михаила Львовича много обязаны последнему обстоятельству. Начав затем учение в Полоцком кадетском корпусе, М. Л. кончил его в 1865 г. в Артиллерийском училище, откуда вышел офицером в Кронштадт. Чрез два года он поступил в Артиллерийскую академию, где кончил курс первым. Его имя вписано там на мраморной доске. Здесь его оставили репетитором для приготовления к преподаванию химии, которой он в последнее время преимущественно интересовался. В 1871 он читал пробную лекцию «о спектральном анализе», а в 1872 г. отправился в командировку на уральские горные заводы. Эта поездка должна была послужить для ознакомления М. Л. с технологиею, которой чтение предполагали ему поручить. На Урале он собрал много материала и по возвращении оттуда стал читать физику и химию в Артиллерийском училище».

«Такова карьера Михаила Львовича, и его наклонности с нею были в согласии — по призванию это был чистый ученый, для которого интерес истины был выше всякого другого. Первая его самостоятельная работа, «Определение меди в латуни» (Ж. Р. Х. Общ. 1871—108), показала уже точность и пытливость, составлявшие его таланты. Вскоре затем он написал «О движении воды и ее расходе в насосах Бунзена» (Ж. Р. Х. О. 1872—15), где анализировал с простотою и ясностью сложные явления названного прибора.

К этой же эпохе относится его работа «О пульсирующем насосе» (Ж. Р. Х. О. 1872—169 = 99—125), сделанная вместе с Г. А. Шмидтом и мною. С тех пор мы продолжали работать вместе, и утрата такого товарища и друга, каким был для меня Михаил Львович, незаменима, потому что все свое свободное время, по возвращении с Урала, с осени 1873 года по самую смерть он посвящал точной, медленной и сложной работе над упругостью газов, начатой мною с 1872 года на средства И. Русского Технического Общества в лаборатории С.-П. Университета. Деля все радости и горести большой работы, мы с Михаилом Львовичем преимущественно изучили упругость разреже-

ния газов, о чем сообщили в апреле 1874 первые результаты в Академии Наук [= 194—193], в Р. Химическом Обществе [= 193] и в Физическом Обществе [= 192]. Подробное описание нашей работы помещено в моем сочинении «Об упругости газов», которое скоро выйдет из печати. Осень 1874 г. М. Л. продолжал эту же работу и даже недели за две до смерти своей приходил еще в лабораторию для продолжения ее, но тогда уже видно было, что его организм страдает сильно. Начало болезни, сведшей Михаила Львовича в могилу, видно было еще в 1872 году. Зимняя поездка на Урал и неблагоприятные ее условия усилили зачатки расстройства, а по возвращении М. Л. уже часто болел, но все крепился, мало обращал внимания на сохранение здоровья и кончил чахоткою. Скромный, симпатичный, полный знаний и талантов, Михаил Львович оставил в каждом, кто его встречал, а не только в тех, кто его близко знал, чистое и отрадное воспоминание, без теней. Оно не может умереть, потому что связано с вечно живущими научными истинами, исканию которых посвящена была вся его молодая, столь скоро угасшая жизнь».

Журнал Русского Химического Общества и Физического Общества 1875 г., т. VII, часть физ., отд. I, вып. 9, стр. 329—333. [1]

ВЫПИСКА

из протокола 31-го заседания Физического Общества

4 Ноября 1875 года

1) Д. И. Менделеев сообщил об определении коэффициента расширения воздуха при обыкновенном давлении по опытам, произведенным им и Н. Н. Каяндером.

Общепринятое число α ($= 0{,}3665$), полученное Реньо чрез измерение перемены давления от 0° до 100°, заключает в себе существующие отступления от Мариоттова закона. Число ($\alpha = 0{,}36706$), полученное Реньо (от 4-х набл.) при постоянном атмосферном давлении и показывающее приращение объема от 0° до 100°, не применяется даже им самим, потому, вероятно, что в методе (5-й способ Реньо, Relation des expériences 1847, p. 59) есть поводы к неточности, а именно при 100° более трети воздуха было вне этой температуры. А между тем такой (при постоянном давлении) коэффициент есть естественнейшее выражение расширения, происходящего при нагревании, ибо его определение независимо от применимости Мариоттова закона. По этой причине г. Менделеев и дал новую методу его определения, причем устраняется сомнение методы Реньо.

Яйцевидный сосуд, емкостью в $V = 3772{,}24$ гр. ртути при 0° помещается *сперва в водяном паре*, (назовем его температуру T), а потом в тающем льду. Сосуд этот кончается внизу и вверху тонкими капиллярными трубками, выходящими из ванны. Нижняя трубка снабжена кранами для прилития и отлития ртути и имеет метку, до которой выпускается ртуть. Верхняя капиллярная трубка, пройдя холодильник и экран, кончается *нефтяным манометром*, другая ветвь которого сообщается с *большим* (емкость $13^1/_2$ литров) шаром, помещенным в ванну, где поддерживается возможно постоянная температура. Яйцевидный сосуд и шар можно сообщать и уединять при помощи ртутных запоров (см. об упругости газов Д. Менделеева Т. I, стр. 84), снабженных кранами.

Когда яйцевидный сосуд наполнен тщательно высушенным воздухом и нагрет до T, запоры закрываются, катетометрически наблюда-

---

[1] [По опечатке страницы 332—333 отмечены цифрой 326—327. Это сообщение напечатано в виде отдельной статьи на французском языке в Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des Sciences (Paris), 132, № 2, 450—454, 1876, под названием «О коэффициенте расширения воздуха при атмосферном давлении].

ются уровни нефти в манометре (они при запирании немного изменяются), и прибор оставляется в парах *часа полтора*, пока не будет ни малейшего изменения уровней нефти в манометре. Упругость воздуха по барометру, определяет T. Упругость воздуха в яйцевидном сосуде равна упругости воздуха в шаре + малый столб жидкости в манометре. Когда затем яйцевидный сосуд будет окружен льдом, в него впускается снизу ртуть, до того, чтобы упругость воздуха при 0° опять была прежняя, что весьма точно узнается при помощи нефтяного манометра. Во льду сосуд держат опять часа полтора, пока не достигнется вполне постоянное давление. Тогда запоры открываются и (после того как наступит обыкновенная температура) ртуть из яйцевидного сосуда выливается до первоначального положения в нижней капиллярной трубке. Назовем ее вес P. Вес ее (поправленный на разновес) изменялся в опытах от 1004 до 1012 гр., смотря по изменению T и другим обстоятельствам. Чувствительность приема так велика, что выливание $^1/_{50}$ гр. ртути ясно обозначается нефтяным манометром Искомый коэффициент x расширения от 0° до 100° определяется формулою:

$$\frac{x}{100} = \frac{P + kT + R - N}{T(V - P + N)}$$

где P и T имеют вышеприведенное значение, V есть объем сосуда при 0° в граммах ртути, k есть изменение емкости сосуда на 1°, определенное 5 раз, и равное в среднем 0,1066 гр. ртути с вероятною погрешностию $\pm 0{,}0002$. Величины R и N суть поправки, зависящие от малого изменения $(t_1 - t_0)$ температуры шара (не более 0°,02), температуры манометра $(\theta_1 - \theta_0)$ и от неполного равенства уровней нефти в манометре. Величины эти определяются выражениями:

$$R = (V + kT)\left[\alpha(t' - t_0) + \frac{0{,}86}{13{,}59}\,\frac{n_1 - n_0}{B}\right] \quad [1]$$

$$N = w(m_1 - m_0) + \omega v(\theta_1 - \theta_0) \quad [2]$$

Величина R только в одном опыте была $= 0{,}21$, значение N в одном опыте было 0,04, в других они были меньше, а потому поправки прямых данных V, T, P и k, служащих для определения x, очень малы. Эта существенная выгода способа наблюдения зависит от того, что при нем части воздуха вне ванны не только малы по величине, но и находятся все время под тем же давлением и при той же почти

---

[1] 0,86 плотность нефтяного масла, B—барометрическое давление, n_1 и n_0—разности уровней при 100° и 0° нефти в обеих ветвях, считая от той, которая обращена к сосуду. Рисунок прибора помещен на XII таблице в сочинении «Об упругости газов».

[2] w — означает емкость, в граммах ртути, 1-го миллиметра манометрической трубки; оно $= 0{,}182$; m_1 и m_0 суть миллиметры высоты нефти в манометрической ветви, обращенной к сосуду; $m_1 - m_0$ не было более 0,3 мм.; v — емкость в граммах ртути (в опытах $v = 3{,}0$ гр.) той части трубки манометра, которая наполнена воздухом и обращена к яйцевидному сосуду; $\theta_1 - \theta_0$ — разность температур манометра; она в опытах не превышала 0°,2.

температуре, а потому служат только средством для передачи давления от сосуда к манометру.

Для вывода среднего взяты данные всех последних девяти опытов, которые суть:

B[1]	T	R	N	P[2]	x
767,4	100°,27	+0,08	+0,01	1009,39	0,36824
767,6	100 ,28	−0,01	−0,01	1010,55	0,36876
770,1	100 ,37	−0,05	−0,01	1011,04	0,36866
768,9	100 ,33	−0,04	+0,01	1010,41	0,36849
766,4	100 ,24	−0,05	+0,01	1009,69	0,36845
767,3	100 ,27	+0,21	−0,04	1009,64	0,36843
759,5	99 ,98	−0,17	−0,03	1007,91	0,36850
772,6	100 ,46	+0,17	−0,04	1010,47	0,36814
749,7	99 ,62	−0,10	−0,01	1004,63	0,36820

Из этих данных следует: 1) при давлении от 750 до 770 мм. коэффициент расширения воздуха есть:

$$\alpha = 0{,}0036843,$$

то-есть, что 1000 объемов воздуха, взятых при 0°, при 100° занимают объем 1368,43.

2) Вероятные погрешности среднего $\alpha = \pm 0{,}0000005$, а для отдельного наблюдения она $= \pm 0{,}0000014$.

3) $\frac{1}{\alpha}$ или, так называемая, температура абсолютного нуля есть:

$$271{,}42$$

4) Называя чрез

$\pm p$ наибольшую возможную погрешность взвешивания,
$\pm t$ „ „ „ в температуре T,
$\pm l$ „ „ „ в величине k

получим, что Δ — наибольшая возможная в отдельном определении α погрешность — есть

$$\Delta = p\frac{V + P + kT}{T(V-P)^2} + t\frac{P}{T^2(V-P)} + l\frac{1}{V-P}.$$

Приняв за среднюю величину наибольших погр[ешностей] $p = 0{,}05$; $t = 0{,}03$, $l = 0{,}0005$, получим, что средняя погрешность в отдельном определении или $\Delta = 0{,}0000016$, что согласно с вероятною погрешностью отдельного опыта. Согласие возможной и вероятной погрешностей дает ручательство за достоверность вывода. Поэтому должно

---

[1] Барометрическое давление при 0°, исправленное на упругость воздуха, в пустоте находящегося. Эта поправка в опытах была от +0,7 до +0,4 мм.

[2] P, вес вылитой ртути, исправлен на разновес.

с полною уверенностью считать, что в новых, столь же точных определениях, в среднем получится число:

от 0,003686 до 0,003683,

вероятнейшее же число ныне есть:

0,0036843.

Журнал Русского Химического Общества и Физического Общества 1875 г., т. VII, отд. I, вып. 9, стр. 316.

ВЫПИСКА ИЗ ПРОТОКОЛА

заседания Химического Общества

6 ноября 1875 г.

19) Д. Менделеев сообщает о коэффициенте расширения воздуха при постоянном атмосферном давлении, по определениям, сделанным им и Н. Каяндером. Средняя величина из 9 определений получена 0,0036843, причем отступления не превысили ни разу 0,0000033, а вероятная и возможная погрешности отдельного опыта не более 0,0000014. Подробности об этом исследовании помещены в протоколе заседания Физического Общества 4 ноября.

Опыты Императорского Русского Технического Общества

ОБ УПРУГОСТИ ГАЗОВ

Д. МЕНДЕЛЕЕВА

Отчет, представленный председателю Императорского Русского Технического Общества

Петру Аркадьевичу Кочубею

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

с XII таблицами рисунков

САНКТ ПЕТЕРБУРГ
1875

Типография А. М. Котомина
Рисунки снимали с натуры: В. Е. Поль, И. Я. Капустин,
П. А. Каншин и др. Литография Н. А. Глыбова
Стенографировал П. И. Никитин и др.
Корректировал Н. Е. Огородников

Милостивый Государь

Петр Аркадиевич

Совокупность основных сведений о свойствах газов выражается тремя законами, показывающими отношение плотности газов к их упругости (закон Бойля и Мариотта), к их температуре (закон Гей-Люссака) и к химическому весу их частиц (закон Авогадро, Ампера и Жерара). Крайняя простота и общность, не терпящая исключений, ставят эти законы, наряду с законами тяготения и постоянства вещества, в основу всех сведений механики, физики и химии.

А между тем известно, что эти три закона не совершенно точны, чем отличаются от открытых Ньютоном и Лавуазье.

Отступления от простейших законов природы нередко показывают, что нам известны лишь первые, наибольшие члены ряда, выражающего истинное отношение явлений.

Таковы, можно думать, отступления от законов соотношения между упругостью, объемом, температурой и химическим весом газов. Объяснения уклонений от этих законов сомнительны, потому что не проверены опытным путем, а вопросы, поднимаемые при этом, имеют первостепенное значение для всего естествознания, как видно из многих спекулятивных попыток, появившихся со времени знаменитых исследований Реньо для выражения отступлений, замеченных этим физико-химиком. Пробелы в опытных сведениях об упругости газов стали особенно очевидными в последнее время, после блестящего развития механической теории тепла, опирающейся на законы изменения упругости с переменою температуры и объема газов. Особенно ощутительны: отсутствие данных для упругости разреженных газов, приближающихся к той воображаемой материи небесного пространства, которую называют световым эфиром, и недостаток точных данных для упругости сильно сжатых газов, сходных по плотности с жидкостями.

В свободное время от других занятий я часто обсуждал способы, какими можно достичь полных и точных опытных данных об изменении упругости газов с переменой их объема, температуры и природы. Хотя мне казалось возможным пойти в этом отношении далее достигнутого до сих пор, однако я знал, что для того потребны не только многие годы работы, но и средства, несоразмерные с теми, какие находятся в моем распоряжении, а потому не смел приняться за выполнение подобной работы. Тем не менее я продолжал свои кабинетные

занятия этим предметом, потому что считал своевременным и настоятельным поднять вопрос об новом опытном изучении упругости газов.

Однажды, в январе 1872 года, Вы, Петр Аркадиевич, застали меня среди таких занятий и пожелали узнать мое мнение и проекты, а узнав их, Вы тогда же внушили мне надежду достать средства для работы, потому что Вы посмотрели на необходимость новых исследований над упругостью газов со стороны применения ее во многих отраслях техники. Вы припомнили, что пружина газов есть источник силы, действующей не только в разнообразных применениях пороха и других средств для получения сжатых газов, но и во многих, год от года умножающихся, газовых двигателях, каковы, например, калорические машины и те, которыми сверлят скалы. Таким двигателям предстоит будущность особенно по той легкости, с какою сжатые газы распределяются по частям. На основании всего этого Вы заключили, что в дальнейшем изучении законов упругости газов прямо заинтересована промышленность.

Таким образом, связав потребности теории и практики, Вы, в качестве председателя Императорского Русского Технического Общества отыскали средства, необходимые для выполнения исследований, мною предположенных.

Затем, вследствие ваших ходатайств, подкрепленных участием Совета Императорского Русского Технического Общества, этому обществу были отпущены из министерств морского и военного средства для исследований над упругостью газов, министерство народного просвещения назначило особую сумму для переделки того помещения, в здании С.-Петербургского университета, где производятся опыты, а министерство финансов ассигновало средства для издания первого тома отчета о работах.

Так родился мой труд над упругостью газов. Вы, Петр Аркадиевич, его восприемник и Вам прежде всего я обязан дать о нем отчет. Не откажитесь вновь быть моим посредником, передавая его Совету И. Р. Технического Общества. Труд мой только что начат, но отчет о том, что более или менее закончено, я считал необходимым и уже возможным предложить общественному вниманию.

Прежде изложения содержания этой первой части отчета, позвольте вспомнить важнейшие моменты в ходе самого исследования, чтобы чрез то показать современное состояние моей работы.

Получив средства для исследования упругости газов, И. Р. Техническое Общество составило из своих членов особую комиссию для рассмотрения моих предположений и для решения вопроса о том, как лучше всего их осуществить. Под председательством А. В. Гадолина эта комиссия составлена из: Г. К. Брауэра, В. Л. Кирпичева, М. Л. Кирпичева, Н. П. Петрова, Ф. Ф. Петрушевского, Л. П. Семечкина и меня. Комиссия поручила мне все заведывание опытами, с тем, чтобы приборы, ненужные более для работы, передавались в музей И. Р. Технического Общества, а счета по расходованию отпущенных сумм поступали к секретарю Общества.

Участие, принятое членами комиссии в самом выполнении работы,

много ее облегчило. Особенно важно было содействие А. В. Гадолина и Л. П. Семечкина. Они не упускали случая помочь начатому делу советом и личным участием. В. Л. Кирпичев принял на себя изучение упругости и сцепления материалов, примененных для устройства приборов, и опыты над сжимаемостью каучука, могущие уяснить некоторые вопросы об изменении емкостей сосудов, подверженных давлению. Н. П. Петров проэктировал и устроил ртутный насос для нагнетания газов. Г. К. Брауэр исполнил, с привычным ему совершенством, большинство проэктированных измерительных приборов. Более же всех принял к сердцу начатое дело М. Л. Кирпичев, недавняя потеря которого лишила меня друга и незаменимого товарища. Над свежею еще его могилою не могу без глубокой грусти вспомнить, какого молодого, симпатического и талантливого деятеля потерял в нем немногочисленный кружок русских ученых. Конец 1873 и весь 1874 год Михаил Львович посвятил участию в начатой мною работе над упругостью разреженных газов и в то же время делил со мной труды по другим побочным работам. В них мне помогли и продолжают помогать и другие сотрудники: Г. А. Шмидт, А. С. Еленев, Е. Е. Пратц, Н. Н. Каяндер, Н. Ф. Иорданский, Е. К. Гутковская и Ф. Я. Капустин, которым осмеливаюсь выразить здесь мою благодарность. А. А. Колокольцов пожертвовал для предпринятой работы многие весьма ценные приборы из литой обуховской стали и этим обязал И. Р. Техническое Общество и меня, признательного ему уже за одно то, что он выполнил их со всем возможным совершенством, едва достижимым на других заводах. Напомню также, что Н. И. Путилов пожертвовал стальные рельсы, потребовавшиеся для укрепления манометра, и не могу не обратить Вашего внимания на ту готовность, с которою артиллерийское начальство, ректор Университета и секретарь И. Р. Технического Общества, Ф. Н. Львов, многократно помогали мне в практических потребностях опытов. Чистый интерес науки, руководящий столь многими лицами, содействующими и помогающими предпринятым опытам, дает право утверждать, что есть действительная потребность в деле, начатом И. Р. Техническим Обществом, и внушает уверенность в том, что дело это будет доведено до конца, если не мною, так другими.

Весна 1872 года прошла в выполнении подробностей проэктирования приборов. Многое пришлось нарочно для этого изучать. Так, например, в это время опытным путем найден был состав мастики или сплава, которым скоро, прочно и герметически соединяются отдельные части приборов, назначенных для опытов при высоких давлениях. Недели, потраченные на эту и ей подобные мелкие подробности, искупаются облегчением и уверенностью, достигнутыми во всех последующих работах. Летом этого года я воспользовался для сличения моих нормальных метров и килограммов с платиновыми прототипами Консерватории Искусств и Ремесл в Париже. Сличения эти сделаны вместе с академиком Треска, равно как и новое сличение килограмма летом 1874 года. Благодаря его участию я надеюсь получить один из новых, заготовляемых ныне, международных платиновых метров. Длинную работу пришлось сделать затем для сличения других моих

мер и гирь с нормами, для подразделения их на части и для определения их коэффициентов расширения. Желая обеспечить неизменность нормальных мер и гирь, я заказал и получил от г. Штерна из Оберштейна $^1/_5$ долю метра и все гири от 500 до 0,1 грамма из горного хрусталя. В точной работе, которую предположено выполнить, неизбежно необходимы тщательные предосторожности для придания единицам меры всей возможной прочности.

Осенью 1872 г. при химической лаборатории С. П. Университета, под руководством покойного, талантливого архитектора И. И. Горностаева, было устроено специальное помещение для производства наблюдений с необходимыми приспособлениями. Тогда я приступил к изучению сжимаемости разреженных газов. Опыты с первыми тремя приборами, устроенными для этой цели, дали неожиданный результат, показав, что отступления от Бойль-Мариоттова закона весьма значительны и для разных разреженных газов однообразны по качеству. Не доверяя первым результатам, я видоизменял и улучшал устройство приборов, вводил новые поправки, много времени посвятил на изучение разных способов определения давлений и построил тот прибор, с которым затем делал определения вместе с М. Л. Кирпичевым. Эти работы длились в 1873 и 1874 годах. Они будут еще продолжаться, лишь только позволит мне время.

Результат этой части работы, вкратце сообщенный в апреле 1874 г. в С.-Петербургской Академии Наук, состоит в том, что при разрежении газов они представляют значительные и притом всегда положительные отступления от Бойль-Мариоттова закона, то есть такие же, каких следует, по моим теоретическим заключениям, высказанным в 1872 году в артиллерийском журнале, ждать непременно для всех сильно сжатых газов и какие Реньо нашел для одного водорода. Так как опыты Наттерера над сильно сжатыми газами, равно как и сведения о пороховых газах, хотя и мало точны, показывают такие же положительные отступления, то у меня невольно родился вопрос: не всегда ли несгущаемые в жидкость газы представляют такие положительные отступления от Мариоттова закона, какие найдены для самых малых давлений и для самых больших? Разрешение этого вопроса опытным путем составляет предмет моих настоящих занятий. Для этого необходимо повторить опыты Реньо над сжимаемостью воздуха при давлениях, немного больших одной атмосферы, потому что тогда, по данным этого исследователя, сжимаемость воздуха отрицательна. Не могу еще высказаться в этом отношении с уверенностью, ибо продолжаю эту работу и уже построил 2-й соответственный требованиям прибор. Поэтому необходимо было оставить пока в стороне те приготовления, какие сделаны были за протекшее время, для приступа к систематическому исследованию над сжимаемостью газов, по весовому способу, под высшими давлениями. Самую работу над этим предметом нельзя еще начать и в настоящее время, потому что весы, потребные для взвешивания сосудов со сжатыми газами, не окончены. Те видоизменения в обычном устройстве весов, которые мною предположены, оказались на опыте отвечающими ожиданиям, как видно

из сообщения о пробных, малых (для 1-го кило) весах, заказанных мною Саллерону в Париже, по его статье, помещенной в Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris 1875. Поэтому я надеюсь, что не встретится никаких существенных препятствий к изучению весовым способом сжимаемости газов, так как манометр для давлений в 80 атмосфер готов, сгуститель, насосы, сосуд для взвешивания и др. части также, и они уже отчасти испытаны в отдельности. Не предвижу также впереди никаких важных трудностей в изучении сжимаемости газов под давлениями, даже столь большими, как те, которые существуют в артиллерийских орудиях, кроме разве того, что тогда потребуются новые, весьма ценные приборы и опытные помощники. Другое дело по отношению к сильно разреженным газам. Здесь только множеством попыток можно преодолеть трудности предмета. А между тем, указанные выше, положительные отступления от Мариоттова закона, при возрастании разрежения, повидимому, постоянно возрастают, а потому изучение сжимаемости газов при очень малой упругости становится особенно настоятельным для решения многих существенных вопросов естествознания.

Так, если допустить, что замеченные отступления будут до конца изменяться в том же направлении, как в опытах с воздухом моих и Кирпичева, то можно ждать при некоторой малой плотности газа уничтожения его упругости, то-есть прекращения в дальнейшем расширения. Тогда должно будет признать существование реальной границы для земной атмосферы, что согласуется с тем фактом, что атмосферы небесных светил несомненно содержат различные газы, чего не было бы, если бы не существовало предела для расширяемости газов. Тогда должно будет признать также, что упругий световой эфир небесного пространства составляет вещество, настолько же отличающееся от газов, на сколько одно химически простое тело отличается от другого, то-есть что они не переходят друг на друга. Это согласуется с тем, что стало недавно известно по отношению к движению кометы Энке. В нем видели доказательство сопротивления, оказываемого небесным эфиром движению светил. Недавно (май 1874) пулковский астроном Астен (Bulletin de l'Académie St.-Pet. XX—187) вывел из наблюдений, что нет никакого повода приписывать эфиру задерживающей способности. Она была бы свойственна веществу небесного пространства, если бы в нем заключались рассеянные частицы газов атмосферы. Принимая границу для разрежения простых газов, должно будет видеть в ней самую предельную форму вещества, а потому нельзя не стремиться к уяснению этой стороны вопроса об упругости газов. Не смею надеяться, что разрешу эти капитальные вопросы, но для подхода к решению их стану еще продолжать разработку сведений о сжимаемости газов при столь малых давлениях, какие только можно измерять. За таковые я считаю давления в десятых долях миллиметра ртути, потому что нефтяными манометрами можно еще мерить их с значительною точностью. Найду себе полное удовлетворение уже тогда, когда успею своею работою обратить внимание на тот опытный путь, которым, по мнению моему, возможно получить некоторое поня-

тие о пределе разрежения газов и о природе светового эфира, который всеми признается, но никому еще не понятен.

Итак, по отношению к существеннейшей задаче работы, я пошел, начиная от самых малых давлений, перешел к давлениям, немного превышающим атмосферное, и затем буду работать над более сгущенными газами. Не думал я встретить значительных отступлений от Бойль-Мариоттова закона в разреженных газах, не мог я ждать и того, что придется повторять работу Реньо над сжимаемостью газов, и это усложнило работу, которой я первоначально думал придать несколько иное направление. Такова судьба каждого труда, в котором разыскиваются возможно точные числа в области предмета, мало разработанного. Необходимость других побочных работ наполняла все остальное мое время. Особенно важно упомянуть о том, что после того, как я нашел значительные уклонения от Бойль-Мариоттова закона при разрежении газов, мне стала очевидна необходимость присоединить к моей работе исследование над отступлениями от закона Гей-Люссака, ибо можно было думать, что уклонениям от одного из этих законов соответствуют уклонения и от другого. Поэтому я приступил с Н. Н. Каяндером к изучению расширяемости газов под постоянными давлениями. Если окажется, что отступления обоих законов тесно связаны, то та совокупность их, которая лежит в основании общепринятой формулы механической теории тепла, может оставаться справедливою, хотя бы даже для разреженного газа и был не применим в отдельности закон Мариотта. Для этой то работы пришлось посвятить немало времени на термометрические этюды, часть которых ныне уже закончена.

Вы знаете, Петр Аркадиевич, с какими подробностями, неудачами и препятствиями разного рода сопряжена всякая научная работа. А моя, сверх того, представляла неоднократно и неожиданные трудности. Поэтому Вы поймете, что скорых результатов ждать нельзя, что полученное надо проверить, прежде чем публиковать, и что во всем этом проходит много времени. Однако теперь самая медленная подготовительная работа сделана и если я буду вновь так же счастлив, как был до сих пор, в отношении сотрудников, то надеюсь идти без уклонения по начертанному выше плану. Один я, конечно, немного могу успеть.

Отчет о всем сделанном Вы найдете в этом издании. В первую часть его не могло быть помещено много из того, что сделано уже, или потому что не закончено, или потому что должно быть изложено в связи с тем, что еще предполагается сделать. Две первые главы составляют введение ко всей работе, следующие семь содержат результаты опытов, наблюдений и расчетов.

В первой главе помещен тот свод соображений о сжимаемости газов и моих проектов для дальнейшего ее изучения, который был представлен Вам еще в начале 1872 г. и затем был помещен в Артиллерийском журнале. Мне казалось необходимым поместить его в этом издании, потому что он составляет действительное начало всего моего труда. Всякому будет очевидно затем, на сколько оправдаются мои первые предположения. Изложив в этой главе некоторые свои специ-

лятивные представления о сжимаемости газов, я избегаю их во всем последующем изложении этой части отчета, предполагая со временем сопоставить вновь добытые данные как между собою, так и с другими сведениями о газах.

Вторая глава начинается выводом новой общей формулы для газов, основанной на трех законах, управляющих газами.

Общеизвестная формула Клапейрона есть частный случай этой более общей формулы, потому что, предположив природу газа и его массу неизменными, последняя формула превращается в первую. Исходя из этой формулы, составляющей то первое приближение к истине, о котором я говорю в начале этого письма, мне было легко элементарными приемами разобрать возможные погрешности в опытах о сжимаемости газов, что было необходимо для оценки способов наблюдения. Разбор возможных погрешностей опыта я считал необходимым сделать с самого начала изложения, чтобы затем судить о результатах только в пределах возможных погрешностей. В конце этой главы помещен вывод принятых мною постоянных для напряжения тяжести, веса воздуха и расширения ртути и воды, чтобы затем не прибегать к объяснению предпочтения, отданного мною одним из этих необходимых постоянных пред другими.

В третьей главе Вы найдете описание практических приемов, примененных мною для скрепления частей приборов, для герметического запора газов, для сушения приборов, для получения безвоздушного пространства и пр. Мне пришлось посвятить очень много труда на оценку разных методов, назначенных для этих целей, и я считал полезным свести в одно целое все эти попытки, чтобы облегчить другим путь и показать тот, которого я держался. Это было особенно необходимо в отношении тех приемов, которые выработались во время самой работы, чтобы дать возможность другим правильно оценить мои способы по отношению к прежде известным.

Четвертая глава посвящена ртутным барометрам, новым испытанным мною способам их приготовления, описанию примененного мною способа наблюдения барометрических высот, нахождению поправок и т. п. Литература этого предмета громадна. Это одно указывает на трудности дела, для побеждения которых я применяю несколько новых способов, делающих результат и более надежным, и легче достижимым. Участие барометрических данных в результате моих опытов с разреженными газами столь велико, что этим одним объясняется значительность труда, посвященного мною на изучение барометров.

По этой же причине я обратил внимание и на давно известный дифференциальный барометр, которому посвящаю пятую главу. Устроив при воздушном резервуаре, помещенном в ванну с постоянною температурою, нефтяной манометр и кран, я достиг того, что прибор этот стал точным измерителем перемен давления, в чем я убедился прямыми сличениями. Основанный на законе изменения объема газа с переменою давления, прибор этот обещает иметь практическую применимость, случаи которой я и рассматриваю в конце этой главы.

Шестая глава посвящена изучению стеклянных трубок, описанию

способов, примененных мною для калибрования, опытам для определения сопротивления трубок разрыву и т. п. Совокупляя здесь все то, что сделано мною в этом отношении, я избег необходимости говорить об этом при последующем изложении.

С седьмой главе описываются катетометры и способы, примененные мною в исследовании, для определения высот столбов жидкостей. Особенности моих приемов станут очевидны при знакомстве с поправками, введенными мною в катетометрические отчеты, и с последнею из четырех устроенных и примененных мною форм катетометров. Изображение катетометра этой последней формы, к сожалению, не могло быть помещено между рисунками, прилагаемыми к этому тому и будет приложено к следующему тому.

Восьмая глава посвящена описанию исследований над сжимаемостью разреженных газов. Я ограничился, для сокращения изложения, описанием последнего (№ 4) из устроенных мною приборов, с которыми опыты сделаны были мною и М. Л. Кирпичевым, а из многих данных, полученным с ним, только немногими. Причиною для этого последнего служило то обстоятельство, что на эти опыты я не смотрю, как на окончательные. Они окончательно убедили меня в существовании положительных отступлений, но не дали окончательных чисел, на которые должно опираться при выводе эмпирической зависимости между объемом и упругостью. Для добычи таких чисел я устроил еще один (№ 5) прибор, с которым мы с М. Л. Кирпичевым начали уже наблюдения, прервавшиеся его болезнью. Конец этой главы посвящен разбору опытов Зильештрема, также публиковавшего исследование о плотности газов под малыми давлениями. Этот исследователь несомненно впал в ошибку, утверждая противное тому, что высказали ранее его я и Кирпичев, на что нашлись точные доказательства в отчете о его работах. Здесь же разбираю я и некоторые другие данные и соображения о положительных и отрицательных отступлениях от закона Мариотта. Существование положительных уклонений не подлежит никакому сомнению, и в наблюдениях, показывающих такой род отступлений, нельзя подозревать причин для значительных погрешностей. Все, какие только можно предположить, должны уменьшать положительные уклонения и приближать их к отрицательным. Последние никогда не бывают значительны для газов, не сгущаемых в жидкости, а потому сомнение в точности наблюдения возможно по отношению к отрицательным отступлениям, пока опыты Реньо не повторены.

В последней главе описываются первые наблюдения над сжимаемостью воздуха при давлениях от 1 до 3 атмосфер. Они окончательно убедили меня в необходимости повторить опыты Реньо над сжимаемостью газов, применяя способы, дающие надлежащее ручательство за бо́льшую точность результатов, чем отступления от Мариоттова закона.

К этой части моего отчета приложено 12 таблиц рисунков. [1] Между

[1] Их снимали с натуры В. Е. Поль, И. Я. Капустин, г. Вольф, А. А. Каменоградский и П. А. Киншин, а гравировал на камне и печатал Н. А. Глыбов; только VII таблицу гравировал и печатал г. Ивансон.

ними находятся некоторые, не описанные в тексте. [1] Приборы эти будут описаны в следующей части отчета. Дробь, стоящая при нумере рисунков, показывает отношение линейных размеров рисунка к натуральным размерам приборов, а потому масштаба нигде не прилагается.

В заключение излагаю состояние денежных счетов, касающихся опытов над упругостью газов. При этом предварительно считаю необходимым пояснить, во-первых, что в этот счет не вошли суммы, ассигнуемые и израсходованные от Университета, в химической лаборатории которого производятся опыты и от которого они пользуются сверх помещения многими другими пособиями, а, во-вторых, что избыток расхода, произведенного мною над приходом, предполагается покрыть со временем из сумм, обещанных И. Р. Техническому Обществу для цели опытов с газами от Артиллерийского и др. ведомств. Заказы приборов и приобретения материалов, потребных для опытов, не могут быть заранее точно определены ни по сроку, ни по сумме. Исполнители новых точных приборов обыкновенно сами не могут вперед назначить их ценности и срока доставки, а некоторые материалы, как ртуть, потребная в опытах десятками пудов, часто меняются с годами в цене. Так в 1871 году пуд ртути обходился здесь в 32 рубля, а ныне цена ее превосходит 80 руб. за пуд. От этих причин зависит невозможность точного заранее определения сумм на производство опытов.

В апреле 1872 года от И. Р. Технического Общества из сумм, ассигнованных на опыты, поступило . 5 000 руб.	По счетам и распискам за №№ 1—96, переданным мною в августе 1874 года секретарю И. Р. Т. Общества, значится уплаченных приобретений и расходов на . . . 11 219 руб. 14 коп.
В октябре того же года 5 000 „	По счетам и распискам за №№ 97—120, переданным мною секретарю И. Р. Т. Общества в марте 1875 года, значится приобретений и расходов на 4 063 „ 10 „
В январе 1875 года из сумм, вновь ассигнованных для опытов, поступило для расхода . . . . . 2 000 „	
Итого прихода [2] 12 000 руб.	Итого расхода [3] 15 282 руб. 24 коп.

[1] Таковы, напр., рис. IX-3 и 4 (сгуститель и сосуд для взвешивания газов). X-4 (воздушный термометр), XII (прибор для определения коэффициента расширения газов при постоянном давлении) и др.

[2] И. Р. Т. Общество, кроме исчисленных денег, назначило лично мне на издание I-й части отчета об опытах сумму в 2000 руб. Расход, произведенный мною по сие время для указанной цели, есть: 1) Уплачено стенографам (преимущественно П. И. Никитину) 123 руб.; 2) уплачено рисовальщикам (имена перечислены в одной из предшествующих выносок) 278 руб. 3) Фотографам (г. Ермолину и др.) 39 руб. 4) За бумагу для рисунков и для текста от Печаткина и др. 438 руб. 5) Граверу Ивансону за 1 таблицу 54 руб. 6) Граверу Н. А. Глыбову за 11 таблиц 556 руб. 7) В типографию за набор, печать и брошюровку 650 экз. следует уплатить около 930 руб. 8) Мелочных 42 руб.

[3] Подлинные счета и расписки, относящиеся к расходу сумм, хранятся у секретаря И. Р. Т. Общества. Считаю не бесполезным перечислить суммы важнейших

затрат, для чего привожу список всех представленных по 15 марта 1875 года счетов, означая при наиболее крупных из них ценность предметов с большею определительностью, чем при счетах на меньшие суммы. Совершенно случайный порядок нумерации счетов соответствует тому порядку, под которым подлинные счета хранятся у секретаря И. Р. Т. Общества. Курсивом напечатаны фамилии механиков и других лиц и учреждений, представивших означенные в счете суммы; копейки в счетах не приведены [в оригинале опечатка: «не приведенных». *Прим. Ред.*] в этом списке. Недостающие нумера соответствуют распискам и тому подобным денежным документам, относящимся к опытам. Под рубрикою «мелкие расходы» значится: добавочное жалование служителям, из которых Антон Бернев особенно полезен и служит с самого начала, плата за пересылку и приобретение мелких предметов, исчисляемых в подлинных счетах.

1.	*Брауэр*. стальные части к манометру для 80 атмосфер	20 0
2 и 3.	*Брауэр*, большой (850) и малый (450) катетометры, 2 нормальных метра (300: и 2 килограмма (60), штангенциркуль (60), статив к барометру с трубчатою шкалою (200)	1920
4.	*Брауэр*, отчетная труба	320
5.	*Брауэр*, 2 малых дифференциальных барометра (144 руб.) и 18 кранов	435
6, 7 и 8.	*Кумберг*, мебель и лампы	67
9.	*Поэль*, заключение условия	49
10.	*Верещагин*, жестяные сосуды	34
11.	*Рихтер*, грубый разновес	40
12.	*Новиков*, краны	34
13.	*Растеряев*, медная труба	9
14.	*Демин*, чертежи весов	10
15.	*Гронмейер*, инструменты	52
16.	*Гардер*, водяные резервуары для холодной и теплой воды	130
17. и 18.	*Семенов*, мебель	116
19. и 20.	*Дехтеринский и Иванов*, проволоки и винты	5
21.	*Штейнгейль*, в Мюнхене, 2 визирные трубы и мелкие вещи	227
25.	*Голас*, в Париже, вентилятор	22
26.	*Демутис*, в Париже, 2 платиновые трубки	90
27.	*Моро*, в Париже, камера клара	21
28.	*Голас*, в Париже, пиезометр, медные трубки и др.	120
29.	*Солейль-Лоран*, в Париже, призмы для весов, стекла, шар из кварца в 200 г. и др.	153
32.	*Виардо*, в Париже, кусок горного хрусталя	16
33.	Счеты перевозки приборов из за границы	91
34.	Различные мелкие счеты	86
35.	*Гейсслер*, в Берлине, стеклянные шары, трубки, термометры	281
От 36 до 39.	*Семенов*, мебель и др. столярные работы	107
41.	*Новиков*, краны и соединения к стальному сгустителю, Обуховского завода	350
42.	*Новиков*, отделка стального сосуда для взвешивания газов	290
43.	*Новиков*, 2 сосуда для прибора № 5 и мелкие	100
44.	*Гронмейер*, десятичные весы	25
45.	*Гейсслер*, в Бонне, термометры	268
46.	*Демкер*, 3 газовых лампы с отражателями	45
47.	*Сан-Галли*, насос Петрова для сжатия газов (800), водяной нагнетательный насос, 2 больших статива и др.	1246
48.	*Витте*, медная крышка к водяной ванне	13
49.	*Ертлинг*, в Лондоне, никкелированный разновес от 5 кило до 1 гр. и мелкий платиновый	197
51.	*Янсен*, стекла	29
52.	*Вунт*, мебель	103
61.	*Гронмейер*, инструменты	14
66.	*Франц*, приборы столярной работы	77
67.	*Витте*, жестяная работа	40

Разность между расходом и приходом составляет 3282 руб., из нее уплачено мною 1980 руб., остальные 1302 руб., составляют действительный наличный долг, который возрастет по мере доставления заказанных приборов.

Вы, Петр Аркадиевич, знаете, что большинство приборов, приобретаемых мною для опытов с газами, имеют такую ценность, что я не страшусь делать новые затраты и, производя их, имею в виду прямые потребности дела, порученного мне И. Р. Т. Обществом.

Согласно выраженному Вами желанию, я перечислю засим те места этой части отчета, в которых описываются предметы, могущие иметь техническое применение или значение, хотя мой труд и отчет о нем и не направлены прямо на технические цели. Излагая отчет, я старался однако достичь одной практической цели: облегчить будущим исследователям работу, подробно описывая все приемы наблюдения, считаемые мною за лучшие. Я был бы очень счастлив, если бы мой труд, в среде выступающих молодых ученых, содействовал развитию склонности к изучению природы газов и к распространению точных методов для их исследования. Высоко ценя прямые практические приложения точных наук, я не обегаю их, но моя цель ныне была иная, а потому

	Руб.
68. *Бем*, в Мюнхене, гониометр	7
69. *Рейнгардт*, термометр	12
72. Различные мелкие расходы и счеты (от № 53 до 60, от 62 до 65, 70 и 71)	215
73 и 74. *Миньон* и *Руар*, в Париже, малая паровая машина и холодильный прибор Карре	284
75. *Боден*, в Париже, термометры (задаток)	29
76. *Шухард*, в Гёрлице, чистый цинк	51
77. *Чикин*, медные трубы	57
78. *Франц*, приборы и части их, столярной работы	123
79. *Перро*, в Париже, сферометр	153
80. *Деби*, в Париже, малая турбина	142
81. *Ритинг*, трубки, шары и др. стеклянные вещи	382
82. *Общество торговли аптекарскими товарами*, ртуть	631
84, 85 и 86. *Гардер*, жестяные приборы	53
87. *Бейер*, медная отливка	14
88. *Белау*, стеклянная работа	25
89. *Петерсен*, жестяная работа	10
90 и 91. *Рихтер*, медные и др. краны	21
92 и 93. *Фохт и Шоппе*, шлифование	28
95. Мелкие расходы: жалованье служителям, пересылка, мелкие покупки	197
97. *Общество торговли аптекарскими товарами*, 12 пуд. ртути	900
99 до 109. Разные мелкие счеты: пересылка, жалование служителям и т. п.	226
110. *Боден*, в Париже, термометры	58
111 до 113. *Вейдеман*, цинковые и медные приборы	273
114. *Новиков*, зажимные краны, 8 газометров для сжатых газов и др.	200
115. *Штерн*, в Оберштейне, масштаб и разновес из горного хрусталя	447
116. *Франц*, столярная работа для приборов	166
117. *Брауэр*, 2 малых катетометра (1000 руб.), стальной насос для ртути (165 руб.), краны и др.	1255
118. *Новиков*, починки и переделки, краны	91
Итого:	15 282

не много могу указать из сделанного мною, что могло бы иметь прикладное значение. Думаю однако, что мастика (§ 29 и 30), ртутный насос без кранов (§ 33), новый способ изготовления барометров (§ 42), дифференциальный барометр (глава V), а особенно его применение для нивеллирования (§ 57—62), способ калибрования трубок (§ 64—71), опыты над сопротивлением трубок разрыву (§ 73—74), новое устройство (§ 80) катетометров и способ наблюдения ими (§ 79) могут быть полезны в техническом отношении, потому что техника все более и более сближается с практикою опытных наук, и лабораторные приемы ныне очень часто целиком переходят в заводские и вообще технические.

Д. Менделеев.

Председателю И. Р. Технического Общества,

Петру Аркадиевичу

К о ч у б е ю.

С.-Петербург
18 Марта 1875 г

Первая глава

О задачах учения об упругости газов и способах их разрешения опытным путем [1]

§ 1

К общим свойствам тел принадлежит упругость их массы или сжимаемость их от давления, но мера ее для различных веществ весьма неодинакова. Для твердых и жидких тел она невелика и, повидимому, уменьшается с возрастанием давлений и увеличивается с приближением тел к их абсолютной температуре кипения. [2] При переходе от нулевого давления к бесконечно большому, объем тел этого рода мало изменяется. Судя по имеющимся данным, должно думать, что каждое твердое и жидкое тело, сжимаясь от давления или охлаждения, стремится к некоторому определенному, предельному, наименьшему объему, а при нагревании оно достигает, дойдя до абсолютной температуры кипения, своего предельного наибольшего объема. Поэтому изменения плотностей твердых и жидких тел ограничены довольно узкими пределами.

Совершенно иные свойства в этом отношении должно приписать газам при современном запасе знаний. Бойль и Мариотт в XVII столетии дали закон сжимаемости газов, [3] подвергавшийся с тех пор

---

[1] Соображения, содержащиеся в этой главе, были сообщены мною (в феврале 1872 г.) председателю И. Русского Технического Общества П. А. Кочубею, потом в марте того же года Русскому Химическому Обществу (Журнал Русского Химического Общества 1872, стр. 102; Ber. d. Deutsch. Chem. Ges. zu Berlin 1872, стр. 332), а затем напечатаны в Артиллерийском Журнале 1872, август, и в Журнале Русского Химического Общества 1872, стр. 809, в виде статьи «О сжимаемости газов». Ныне статья эта дополнена и изменена, однако весьма незначительно.

[2] Абсолютною температурою кипения я называю такую температуру, при которой частицы жидкости вполне теряют свое сцепление (поднятие в капиллярной трубке = 0, скрытое тепло испарения = 0) и при которой жидкость, несмотря ни на какое давление и объем, вся превращается в пар. Для эфира эта температура близка к 180°, для хлористого кремния к 210°, для жидкой углекислоты к 31°. См. об этом мои статьи в Химическом Журнале Соколова и Энгельгардта: Г. III—81 и 145; Горный Журнал 1860, VIII, 210; в Liebig's Annalen CXIX — p. II и в Poggendorff's Annalen 1871, B. 141—618. Эту температуру Андриус назвал потом «критическою точкою» (the critical point). Связь сжимаемости от охлаждения и от давления особенно ясно видна в наблюдении Наттерера, показавшего, что жидкие CO^2 и N^2O сильно сжимаются от давления, а известно, что они значительно сокращаются и от охлаждения (Андреев, Дрион).

[3] Упругость газа обратно пропорциональна его объему, или плотность возрастает пропорционально давлению. Историю этого закона можно найти в Gehler's Phys. Wörterbuch IV—1026 и в Regnault, Relations etc. 1—329. В этой главе мы

многократным испытаниям, говорившим то за, то против точной применимости этого закона. В резкой своей форме он дает повод думать, что при нулевом давлении объем газа будет неизмеримо велик, а при бесконечно большом давлении будет неизмеримо мал. В обоих случаях газ как бы исчезает. Изменения плотностей безграничны в обе стороны. Эти крайние следствия, хотя и не допускают опытной проверки, давно заставляли искать отступлений от закона Бойль-Мариотта. Главнейшими моментами в истории этого вопроса должно считать, во-первых, открытие способности газов превращаться в жидкости чрез сжатие давлением и охлаждением и, во-вторых, возможно точное измерение малых отступлений от закона для всех газов, сделанное Реньо, показавшим, что водород менее, а другие газы более сжимаются, чем следует по закону Мариотта, при переходе от 1 до 30 атмосфер. Из своих знаменитых исследований над сжимаемостью газов, *Реньо* сделал следующий *вывод*: ни один газ не следует закону Мариотта в точности, хотя сжимаемость всех газов, особенно при малой плотности (достигаемой нагреванием или разрежением), близко подходит к той, какую требует закон; водород при обыкновенной температуре менее сжимается, чем следует по закону, но вероятно при некотором значительном давлении и он будет сжиматься более, чем следует по закону, как то замечается над всеми другими газами, превращенными или еще нет, в жидкость. Таким образом Реньо допускает, что при значительном давлении все газы сжимаются *еще более*, чем следует по закону Мариотта, и приписывает это тому, что газы тогда близятся к жидкому состоянию. [1] В настоящее время, с утверждением понятия об абсолютной температуре кипения, нельзя уже думать, что всякий газ, при каждой температуре, сильным давлением превратится в жидкость, а потому соображения Реньо не должны ныне иметь места. Но и помимо этого, вышеизложенное заключение Реньо должно считать поспешным, по следующим причинам:

1) Реньо не определял погрешностей своих наблюдений над сжатием газов, а потому можно думать, что часть замеченных им отступлений от закона находится в пределе погрешностей. Подтверждением этому служит сличение отдельных наблюдений. Так, например, для воздуха (переводя все данные, где дана температура, к 5°) при переходе от давления, равного 1 атмосфере, к давлению в 2 атмосферы, произведения из объема на давление (эти произведения по закону Мариотта должны быть постоянными) относятся между собою как:

1 : 0,9988,	судя	по	данным	I	тома	Relation	стр.	347
1 : 0,9998,	„	„	„	II	„	„	„	235
1 : 0,9979,	„	„	„	II	„	„	„	248

означаем давления чрез p и измерение их выражаем столбом ртути при 0°, объем означаем v, а плотность d. По закону Бойль-Мариотта для данной массы газа при изменении p всегда остается $p \cdot v$ или, еще общее, $\frac{p}{d}$ или $\frac{a}{p}$ величиною постоянною.

[1] Relation des expériences etc. (Из Мемуаров парижской академии) Т. 1 (1847), стр. 402, 414 и др.

Из этих, равно как и из других данных, Реньо должно вывести заключение, что в отдельных числах небходимо допустить погрешность, не меньшую, как $^1/_{1000}$ произведения, получаемого из давления на объем, а для воздуха наибольшее из точно наблюденных Реньо отступление (при переходе от 12 к 24 атмосферам) $= {}^6/_{1000}$.

2) Реньо не исправил своих данных для высоты ртутного столба, определяющего давление, на изменение длины шкалы от теплоты, на вес сжатого столба воздуха, а поправка на температуру ртути (чрез нахождение среднего из нескольких термометров, висящих на разных высотах вне ртутного столба), введенная Реньо, недостаточно точна. Наблюдения над объемами газов у него не исправлены на сжимаемость сосуда, в котором делался опыт, и который был снабжен краном, посаженным на суриковой замазке. Наблюденные объемы не исправлены также на остающуюся влагу, а судя по тому, что для сушения были употреблены трубки с пемзою, смоченною серною кислотою, и что газы должны были итти к насосу быстро, можно думать, что влага еще оставалась в газах; и она могла влиять на сжимаемость при больших давлениях.

3) Реньо сжимал газы в стеклянных трубках высотою в 2 метра и диаметром в 1 сантиметр, а потому имел большую сгущающую поверхность, а меры этого сгущения не определил (Relation I—406). Достаточно предположить, что все газы, кроме водорода, сгущаются на поверхности стекла, а Киоцца, Магнус и др. даже измеряли величину такого сгущения, и если затем допустить увеличение сгущения с возрастанием давления, то этим можно объяснить замеченные отступления от закона Мариотта. При этом водород может составить исключение потому, что в нем заметны многие признаки металлов, а они стекла не смачивают. Такие предположения оправдываются моими, правда неполными и давними наблюдениями,[1] показавшими, что стекло, тщательно промытое и накаленное, по охлаждении в разных газах, столь же плохо смачивается водою, как и обыкновенное, а охлажденное в атмосфере водорода смачивается так же хорошо, как и то, которое охлаждено в безвоздушном пространстве.

4) Хотя число наблюдений, сделанных Реньо, и весьма велико, но вследствие отсутствия точной связи между отдельными определениями, нельзя вывести из данных точной меры отступлений от закона. Это будет очевидно, если напомнить способ наблюдения Реньо: он брал объем газа V под давлением P и сдавливал газ, увеличивая давление до P_1 и P_2 так, чтобы объем был приблизительно равен $^1/_2$ V и $^1/_3$ V. Затем в другом опыте мерился тот же объем V под новым давлением P′ и опять доводился до $^1/_2$ и $^1/_3$ V. Если бы P′ было равно, или близко к P_1 или P_2 предшествующих опытов, то можно было бы найти точную зависимость плотностей от давлений, но этого не было всегда соблю-

[1] Об этом я упоминаю в I т. «Основы химии» стр. 219. Считаю долгом упомянуть о том, что мое мнение о причине различия водорода от других газов (которые, я полагал, сгущаются на стекле и тем препятствуют смачиванию его) поколебалось, когда я сделал опыт с углекислотой, думая, что она будет растворяться и допустит смачивание; но его не было, а потому я не продолжал опытов.

дено, а потому вывод о плотности газа будет заключать погрешность гораздо бо́льшую, чем отдельное наблюдение. Так у Реньо для воздуха есть (в I т. стр. 374—379) 9 рядов, для которых средние давления в миллиметрах ртутного столба были:

P	739	2112	2069	4142	4219	6770	6390	9334	11474
P_1	1476	4210	4127	8178	8406	13474	12729	18547	21057
P_2	—	6350	—		12928	19202	19400	—	—

Поэтому нельзя сделать суждения о плотности воздуха при давлениях от 1476 до 2069, а для давлений от 4 до 6 и 8 метров выходят данные весьма между собою различные, смотря по тому, какой ряд возьмем для определений. Поэтому, хотя опыты Реньо и показывают ясно *качественную* сторону отступлений от Мариоттова закона, но не дают строгой возможности судить о *количественной* стороне отступлений.

5) Способ определения давлений, принятый Реньо, будучи сходен со способами Бойля, Мариотта, Араго и др., не допускал наблюдений при давлениях, бо́льших, чем в 30 атмосфер, а между тем при высоких давлениях и сосредоточивается интерес, потому что уже прежние исследования показали, что при малых газы слабо отступают от закона. При давлениях выше 15 атмосфер данные Реньо не только содержат увеличенную погрешность, судя по способу наблюдения, [1] но еще и потому, что тогда пришлось определять высоты без других мерительных средств, как глаз и циркуль, ибо на небольшие высоты нельзя было поднимать катетометра.

§ 2

Несмотря на указанную недостаточность данных Реньо, они все-таки суть самые точные и полные из всех определений этого рода, а потому они заслуживают наибольшего доверия, возрастающего при знакомстве со всеми подробностями его наблюдений и от того вполне заслуженного авторитета, каким пользуется повсюду имя этого французского химика и физика. Вывод Реньо об отступлениях всех газов от Мариоттова закона возбудил многие спекулятивные попытки примирить полученный результат с господствующим понятием о совершенном газе, точно следующем закону Мариотта. Отступления приписывают взаимодействию (то притяжению, то ударам или сталкиванию, то внутреннему давлению) газовых частиц друг на друга. Понятие о совершенном газе, несмотря на исследования и замечания Реньо (1—402), еще сильнее, чем прежде, стало распространяться, хотя для утверждения его и не достает поныне исследований над плотностями газов под малыми давлениями. Тогда частицы газов так удалены, что взаимодействие их должно уменьшиться, и газ должен точнее следовать закону Мариотта, если представление о совершенном газе верно.

[1] Хотя Реньо и отрицает это. Большая погрешность в данных для высоких давлений заключается у Реньо потому, что к определениям плотностей при высоких давлениях возможно дойти только при посредстве предварительных наблюдений при меньших давлениях, а потому в них заключается сумма погрешностей определений, совершенных при низших давлениях.

Совершенным газом называют такой идеальный газ, который точно сжимается по закону Бойль-Мариотта, а при нагревании расширяется по закону Гей-Люссака. Предполагается, что все газы при удалении своих частиц, то есть при нагревании и под уменьшенным давлением, близятся к совершенному состоянию. Действительно, исследования Реньо над коэффициентом расширения газов показали, что при давлениях, близких к атмосферному, различные газы имеют далеко неодинаковые коэффициенты расширения, но он принимает, что по мере уменьшения давления коэффициенты расширения всех газов приближаются к одному числу,[1] меньшему, чем то, которое получается для давлений обыкновенных. В последнее время Амага [2] показал, что при возвышении температуры коэффициенты расширения различных газов становятся более между собою сходными и стремятся к определенному пределу 0,00366. Таким образом, понятие о приближении действительных газов к состоянию совершенного газа по мере удаления частиц оправдывается опытным путем, по отношению к закону Гей-Люссака, но по отношению к Бойль-Мариоттову закону вовсе нет еще данных для оправдания такого понятия, потому что нет точных исследований над сжимаемостью газов под давлениями, меньшими атмосферного, а при обыкновенном давлении газы не точно и далеко не одинаково следуют Бойль-Мариоттову закону, как видно из опытов Реньо. Между тем на понятии о совершенном газе основывается вся, ныне столь развитая и важная в теоретическом и практическом отношении, так называемая механическая теория теплоты. Допуская в ней приближение известных нам газов к совершенному состоянию, по мере уменьшения их плотности, мы сводим наши сведения о реальных газах на теоретически понятные свойства совершенного газа. Отступления от этих свойств нам стали известными, необходимо же определить их меру в различных условиях, чтобы знать, на сколько далеки наши современные понятия о природе газообразных тел от действительности, чтобы итти твердо на пути изучения вещества, потому что газообразное состояние материи есть ее простейшая форма, наиболее доступная изучению, как показывают все данные физики и химии о телах твердых, жидких и газообразных.

Потребность в изучении разреженных газов в отношении их сжимаемости, то-есть применимости к ним Бойль-Мариоттова закона, определяется еще тем значением, какое имеют сведения этого рода по отношению к изучению небесного пространства и по отношению к данным, добытым при изучении электропроводности газов под малыми давлениями. Совокупность современных сведений заставляет

---

[1] Relation I—120. Строго говоря, данных для этого вывода в исследовании Реньо нет, потому что он только для воздуха определил изменения коэффициента расширения при давлениях менее атмосферы, для других газов только для атмосферного и еще бо́льших давлений.

[2] В своей диссертации (Thèses 1872) и в извлечении из нее, помещенном в Annales de Chimie et de Physique (4) XXIX. См. особ. стр. 72 диссертации, где очевидна полная уверенность в существовании предельного состояния газов, когда они становятся совершенными.

признавать всюду в природе распространенную упругую материю, называемую эфиром, или точнее, световым эфиром. Переход газов атмосферы на пределах ее в эфир представляется или резким (между прочим, Лапласом и Пуассоном), или постепенным, то есть атмосфера принимается ограниченною или распространяющеюся в бесконечность небесного пространства. В первом случае, между телами весомыми, каковы газы атмосферы, и эфиром — ничего нет общего, во втором, можно допустить, что эфир есть разреженный газ. Если первая гипотеза справедлива, должен быть предел разрежения газов, а потому, так как в природе все изменения последовательны, должно ждать отступлений от Бойль-Мариоттова закона при очень малых давлениях, хотя бы при наших опытах мы и не достигли до предела расширения газов. Тогда смысл отступлений должен быть таков, что исходя от малого давления p и перейдя к давлению еще меньшему $\frac{p}{n}$, мы получим, что первоначальный объем v изменится не в $v \cdot n$, а станет меньшим, то есть будет $= vn - a$, а потому тогда при давлении p произведение из давления на объем будет pv, а при меньшем давлении $\frac{p}{n}$ оно будет $pv - \frac{ap}{n}$, следовательно, с возрастанием давления, тогда pv будет возрастать. Если допустить вторую гипотезу, то-есть принять, что атмосфера безгранична, и допустить, что эфир есть разреженный и всюду находящийся газ в предельной (атомной, а не частичной) своей форме, тогда можно ждать, при самых малых давлениях, или подтверждения, или отрицания Бойль-Мариоттова закона. Если он справедлив, то газы атмосферы не должны иметь границы, [1] как не представляет границы для расширения газов и самый закон, требующий при бесконечном малом давлении бесконечно большого объема газа. Если расширение с уменьшением давления будет совершаться быстрее, чем по закону Бойль-Мариотта, то и тогда границ атмосферы невозможно предположить, не прибегая к новым гипотезам, но тогда отступления от закона будут такозы, что с возрастанием давления произведение $p \cdot v$ будет уменьшаться. Можно допустить, но с бо́льшим трудом, то же следствие при обратном наблюдении, которое скорее всего будет в пользу первой гипотезы. Так как есть повод думать, что наша атмосфера действительно отличается от атмосферы других небесных светил, то надо думать, что она ограничена, а потому можно ждать отступлений от закона Бойль-Мариотта при малых давлениях. То же следствие вытекает из наблюдений над электропроводностью

[1] Нельзя допустить в воздухе способности сгущаться в жидкость (Пуассон) под влиянием холода небесного пространства, потому что под такими малыми давлениями, в которых надо принять низкую температуру в атмосфере, нельзя представить перехода в жидкость, притом и температуру небесного пространства нельзя ныне считать очень низкою, как то еще можно было допустить во время Пуассона. Сверх того, существование сгущенных в верхнем слое атмосферы газов в твердое или жидкое состояние мы бы наблюдали, если бы оно было, подобно тому, как наблюдается сгущение водяных паров.

газов, взятых под малыми давлениями, особенно из наблюдений Моррена.[1] Он показал, что все газы, начиная от давлений в 60—20 миллиметров ртутного столба и доходя до давлений около 1 миллиметра, представляют правильное, хотя и различное возрастание электропроводности, но затем, достигнув некоторого наибольшего значения, при давлениях около 1 миллиметра, способность эта во всех газах быстро уменьшается. Известно, что пустота не проводит электричества, то-есть эфир не обладает свойством подвергаться электрическому роду движений, хотя и имеет свойство передавать световые движения. Если между газообразным и эфирным состояниями материи есть последовательный переход, происходящий при уменьшении давления, то вышеприведенные наблюдения становятся совершенно исключительными и непонятными, но допустив изменение в сжимаемости газов при малых давлениях, то-есть допустив отступления от Бойль-Мариоттова закона, можно думать, что изменения в электропроводности совпадают с изменениями этих отступлений и находятся с ними в тесной зависимости.

Все вышеизложенное заставляет желать новых исследований над сжимаемостью газов, особенно под малыми давлениями, а если сделать обзор существующих сведений о плотностях сильно сжатых газов и принять во внимание соображения о соотношении между физическими свойствами тел и их составом, как то изложено вслед за сим, то необходимость в новых наблюдениях над плотностями газов при разных давлениях выступает с настойчивостью весьма живого научного вопроса, ибо от решения его зависят основные сведения о простейшем состоянии материи.

§ 3

Ерстедт и Свендсен[2] испытывали до 70 атмосфер сжимаемость воздуха, при чем держались лучшего способа для определения плотностей, а именно весового, но давления измеряли мало надежным способом, каким до сих пор и всегда определялись высокие давления, а именно определяли груз, поднимаемый при давлении на данную площадь, и пришли к тому заключению, что воздух в пределе точности наблюдения еще следует закону Бойля и Мариотта до 70 атмосфер. Этот вывод, несогласный с другими данными и особенно с данными Реньо, показывает, что способ наблюдения, принятый этими знаменитыми наблюдателями, был довольно мало точен.

Богатый материал для суждения о зависимости между давлением и плотностью газов доставляют *исследования над пороховыми газами*. Между ними первое место по точности и обширности, а также и по времени, занимают те, которые сделаны были еще в прошлом столетии известным английским физиком Румфордом в Мюнхене, при содей-

[1] Morren, Annales de Chimie et de Physique 1865 (4) T. IV p. 325.
[2] Oerstedt and Sweendsen, Edinburgh Journ. of Science VIII—224, Gehlers Physik, Wörterbuch 1828 T. 4 p. 1040.

ствии баварских офицеров. [1] Наблюдения эти произведены в особой вертикально поставленной мортирке с отверстием в 0,3167 кв. сант. Это отверстие плотно запиралось кожаною пробкою, на которую накладывался груз (выраженный в английских фунтах, коих вес таков, что 0,95 фунта отвечает давлению 1 метра ртути на поверхность пробки), а по нему определялось давление. Зарядив мортирку известным количеством пороха и нагрузив грузом пробку, производили взрыв (чрез накаливание особой замкнутой нижней части мортирки) и наблюдали, что делается с грузом. Если он не шевелился, значит, давление, развиваемое порохом, меньше положенного груза; тогда его убавляли, вновь клали тот же заряд и доходили до такого груза, при коем груз только что шевелился. Веса пороха, при равенстве [2] емкости мортирки, будут пропорциональны [3] плотности пороховых газов. Эти веса менялись от 1 до 16 гранов, причем нагрузка изменялась от 57 до 5220 фунтов. Если бы пороховые газы следовали Мариоттову закону, то нагрузка должна была бы возрастать пропорционально плотности газа или весу пороха, а между тем отношения суть:

$d =$	1	2	3	4	5	6	7	8
$p =$	60,	192,	228,	296,	434,	531,	628,	900,
$d =$	9	10	11	12	13	14	15	16
$p =$	1 119,	1 457,	1 716,	1 994,	2 551,	3 108,	3 662,	5 497

Следовательно, когда плотность увеличилась в n раз, давление увеличилось более, чем в n раз, например, когда плотность из 8 стала 16, то есть возросла в два раза, давление увеличилось в 6 раз, а потому закон Мариотта здесь неприменим. [5]

Взятые сами по себе эти опыты мало надежны, ибо дело идет о смеси паров и газов, имеющей вероятно и разные температуры, но при сопоставлении этих данных с другими и принимая во внимание те громадные давления, каких можно достичь этим способом, нельзя отказать и им в некотором значении, тем более, что, допуская закон Мариотта, невозможно объяснить громадных отступлений, здесь замечаемых, уже потому, что при давлениях, сравнительно малых (до 600 метров), здесь оказывается закон Мариотта близким к действитель-

---

[1] Philos. Transact. 1797 P. II—221. Извлечения помещены во многих физических и военных журналах и в специальных сочинениях. Напр., в Русском Артиллерийском Журнале 1810 г., IV, 50 и V, 54, Piobert, Traité d'artillerie 1859—337 etc

[2] Этого равенства впрочем в действительности не было, потому что емкость мортирки при разных давлениях и температурах была неодинакова, кожаная пробка сжималась, стенки со временем расширялись (можно судить об изменении формы уже по тому, что мортирку при заряде, бо́льшем 16 гранов, разорвало) и т. д.

[3] Строго говоря, этого допустить также нельзя не только потому, что температуры газов при разных количествах пороха различны, но и потому еще, что ныне уже несомненна изменчивость состава порохового остатка и газов, смотря по давлению, при котором горит порох, как то ясно доказано Н. П. Федоровым (Артиллерийский Журнал).

[4] Они в прилагаемой таблице означены чрез d, чрез p означены давления в метрах ртутного столба.

[5] Румфорд и Пиобер старались выразить зависимость p от d показательной функциею, но и она плохо удовлетворяет всей совокупности данных

ности, [1] а этого бы не было, если бы в опытах заключались очень грубые неточности.

Из других опытов над отношением плотностей и давлений пороховых газов должно обратить внимание на американские опыты Родмана, [2] но они менее обширны и еще менее точны, чем опыты Румфорда. Так, Родман определял давления особым, ныне часто в артиллерии применяемым прибором (Родмана), состоящим из стальной призмы, на вершине которой находятся площадки тупой (по отношению к вертикальной оси, которая у этой пирамиды коротка) и длинной (по одной из горизонтальных осей, перпендикулярных к оси призмы) ромбической пирамиды. Ее вершина упирается в медную доску и при взрыве вдавливается в нее. По длине полученного углубления судят о давлении, потому что предварительными опытами можно установить отношение между длиною углубления и давлением, производимым на призму. Данные Родмана (в бомбе) близки к добытым Румфордом, особенно если принять во внимание, как это указал А. В. Гадолин, разность состава пороха обоих исследователей:

$d =$	700,	1 000,	1 400,	2 000,	2 333,	2 800,	3 500	4 667,	7 000
$p =$	55,	87,	130,	223,	354,	419,	451,	691,	1 962

§ 4

Значение опытов с пороховыми газами, при всей их очевидно малой точности, значительно возрастает *при сличении* их *с данными* австрийского ученого *Наттерера*, известного своими приборами для получения газов в жидком виде. Наттерер, занимаясь вопросом о превращении газов в жидкое состояние, пробовал, хотя и напрасно, сгустить в жидкости воздух, азот, кислород, водород, окись углерода и болотный газ, до сих пор не сгущенные в жидкость. При этом он заметил уже, что объем сдавленного газа не соответствует закону Мариотта и, желая это проверить, устроил, [3] при содействии Редтенбахера и Венской Академии Наук, новый прибор для сдавливания газов. Он состоял из стального ствола диаметром снаружи в 79 мм., внутри около 16 мм., длиною 47 сант., емкостью около 60 кубических сантиметров. К одному концу его был приделан винтовой кран, служащий для выпуска сжатого газа, а к другому клапан и цилиндр с поршнем, движимым винтом и сдавливающим газ, уже предварительно сжатый раз во 100. Затем Наттерер, [4] сгустив сколько было возможно данный газ, определял его упругость при помощи груза, давящего

[1] В самом деле для малых давлений данные Румфорда близко выражаются формулою, требуемою законом Мариотта, а именно $\frac{d}{p} = \frac{1}{85}$. Вычисленная плотность мало отличается от наблюденной.

[2] Данные для опытов Родмана сообщены мне М. Л. Кирпичевым, которому я обязан и многими другими сведениями по вопросам, касающимся артиллерии и относящимся к этой статье.

[3] Sitzungsberichte d. Math.-Naturw. Classe d. Kais. Akademie d. Wissenschaften. Wien. 1851. T. VI—557.

[4] Ibid. 1854. T. XII—199.

на систему сложных рычагов, давящих в свою очередь на цилиндр, герметически приточенный к особому отверстию сосуда, в котором сдавлен газ, причем принято было во внимание трение. Зная размеры плеч рычагов, вес груза, меру трения и площадь, на которую газ давит, Наттерер определил давление газа в атмосферах. Тогда он выпускал газ в мерительный цилиндр в количестве 10 объемов сосуда, вновь определял давление оставшегося газа, вновь выпускал 10 объемов (измеренных при обыкновенном давлении и температуре, но они не даны) и т. д., пока упругость оставшегося газа не была равна атмосферной. Складывая объемы выпущенного газа, Наттерер получал число объемов, соответствующее данному давлению и помещающееся при нем в сосуде. Давления приведены мною к высотам в метрах ртутного столба при 0° и чрез интерполирование найдены числа прилагаемой таблицы, выражающей совокупность результатов опытов Наттерера.

Давление в метрах ртутного столба при 0°	Число объемов газа, смеренного при атмосферном давлении и заключающегося в одном объеме при указанном давлении. Эти величины пропорциональны плотностям, то есть весам разных объемов.				
	Воздуха	Азота	Кислорода	Водорода	Окиси углерода
100	128	127	132	126	131
200	244	243	254	229	250
300	343	331	368	329	358
400	405	389	451	410	421
500	451	434	503	484	466
600	485	472	544	544	501
700	512[1]	503	577	595	529
800	537	528	606	641	554
900	561	549	631	685	575
1 000	582	567	652	725	594
1 100	600	584	—	762	611
1 200	617	599	—	797	626
1 300	632	612	—	830	641
1 400	646	625	—	863	655
1 500	659	638	—	894	667
1 600	671	650	—	919	678
1 700	682	662	—	942	689
1 800	693	672	—	961	699
1 900	704	683	—	977	709
2 000	714	693	—	992	717
2 100	724	703	—	1 006	725
2 736[2]	800	710	—	1 040	730

[1] Если бы опыты Наттерера были точнее, то, судя по числам, полученным для азота и кислорода, для воздуха должно было бы получить при давлении 700 метров 500 объемов, а получилось 512. Следовательно, в числах Наттерера, наверное, уже есть некоторая и немалая $\left(\text{по крайней мере } \frac{1}{100}\right)$ погрешность.

[2] Данные до 2100 метров давления взяты из мемуара Наттерера 1854 года, а относящиеся к давлению в 2736 метров ртути (=3600 атмосферам) из его мемуара 1851 года.

Данные Наттерера [1] приводят к тому же самому выводу, как и опыты Румфорда, показывая, что давления возрастают гораздо быстрее, чем плотности, и притом для разных газов неодинаково. [2] Так как в отчете Наттерера не приведены ни точные способы очищения (особенно сушения) газов, ни способы измерения объемов, не дано температур, нет доказательств на то, что газ не терялся при его выпускании и т. п., словом, так как в его определениях не видно признаков точности, то данным Наттерера нельзя доверять в подробностях. Можно было бы даже сомневаться и в справедливости главного вывода опытов, если бы этот вывод не согласовался с развитыми далее соображениями и с результатами, добытыми над пороховыми газами. Чтобы сделать сличение обоих родов наблюдений, изойдем из тех плотностей, какие имеют газы при давлении в 100 метров ртутного столба и найдем, приняв плотность при этом давлении равной 100, какую плотность имеют газы при высших давлениях. Графический способ интерполирования дал следующий результат:

Плотности газов (d)	При давлении ртутного столба в метрах.								
	$p =$ 100	200	400	600	900	1 200	1 500	1 800	2 100
Пороховые газы[3] по Румфорду	$d =$ 100	191	344	461	567	641	721	794	861
Воздух по Наттереру	$d =$ 100	190	315	377	437	481	513	540	564
Водород	$d =$ 100	182	325	440	544	633	710	763	800
Окись углерода	$d =$ 100	191	321	382	439	478	509	534	553
Пороховые газы по Родману	$d =$ 100	166	241	360	—	—	—	599	—

[1] Каильте (Cailletet, Comptes rendus XX—1131) в 1870 г. сделал ряд наблюдений над сжимаемостью воздуха и водорода и пришел к числам, весьма сходным с теми, какие ранее его получил Наттерер, наблюдений которого Каильте, повидимому, не имел в виду, производя свои исследования. Каильте сжимал газы до давления в 705 атмосфер, и полученные им результаты и до сих пор подробно не описаны, почему я и не считаю необходимым разбирать их. Укажу только на один пример, показывающий близость данных Наттерера и Каильте. При давлении в 600 атмосфер или в 501,6 метров ртути, для воздуха Каильте дает значение $\frac{1}{pv} = 0{,}6895$, если при 1-й атмосфере $\frac{1}{pv} = 1$, а по Наттереру следует, что тогда в 1-м объеме заключается 453 объема воздуха, смеренного под атмосферным давлением, следовательно, при 1-ой атмосфере $p = 1$, $v = 453$, а при 660 атмосферах, $p = 660$, $v = 1$, а потому, приняв $\frac{1}{pv}$ для 1 атмосферы $= 1$, получим для 660 атмосфер для воздуха $\frac{1}{pv} = \frac{453}{660} = 0{,}682$. Таким образом, данные Наттерера и Каильте сходны между собою, но это сходство не подкрепляет уверенности в числах, потому что и у Каильте, как у Наттерера, приемы наблюдения недостаточно точны, судя по имеющимся описаниям.

[2] Это последнее обстоятельство выражено слабо и, может быть, зависит только от различного отношения газов к сосудам или от неточности наблюдения.

[3] При этом принят, судя по интерполированию, вес пороха, дающего в мортире Румфорда давление 100 метров ртутного столба, = 1405 граммам.

Из этой таблицы очевидно, что не только смысл отступлений от Мариоттова закона,[1] но даже и мера этого отступления по опытам, столь различным, как опыты с пороховыми газами и опыты Наттерера (особенно для водорода), выходят близкими друг к другу, если принять во внимание погрешности, несомненно свойственные обоим наблюдениям. Близость чисел заставляет обратить внимание на указанные наблюдения. Будучи взяты в отдельности, они не получили права гражданства в физике, конечно, по их недостаточной точности, а совокупность этих опытов дает повод думать, что есть какой-то общий закон для изменения плотностей газов с давлением и притом совершенно иной, чем Мариоттов закон, ибо пороховые газы имеют иной состав, чем газы Наттерера, и температуры газов в обоих родах наблюдений весьма различны, а закон изменения плотностей, повидимому, один и тот же, или по крайней мере близкий для разных газов. В настоящее время, однако, было бы напрасно пытаться утвердить существование такого закона, так как все имеющиеся до сих пор данные содержат грубые погрешности.

Все это дает, однако, новое побуждение заняться подробнейшим исследованием представляющегося вопроса, о чем я и говорю во второй половине этой главы. Но прежде чем перейти к ней, я изложу те спекулятивные соображения, которые оправдывают существование отступлений, видимых в опытах Румфорда и Наттерера, и служат противувесом тем соображениям, которые ныне наиболее распространены, а потом постараюсь свести в одно целое запас данных, добытых наблюдениями Реньо и Наттерера.

§ 5

Судя по закону Бойль-Мариотта плотность газа возрастает пропорционально давлению. Реньо и за ним многие другие думают, что газ, не сгущенный в жидкость, будет при значительных давлениях уплотняться еще б о л е е, чем следует по закону Мариотта, приближаясь чрез то к жидкому состоянию, а потому для всех газов допускается, что с возрастанием давления pv или $\frac{p}{d}$ будет уменьшаться. Однако же то, что известно нам о свойствах постоянных (то есть не сгущающихся в жидкость) газов (O^2, N^2, H^2, CO, CH^4, NO) заставляет думать, что при высоких давлениях они будут сжиматься м е н е е,[2]

---

[1] То-есть, по всем указанным наблюдениям с возрастанием p, частное $\frac{p}{d}$ возрастающее, по Реньо, для водорода и уменьшающееся для воздуха, здесь для всех газов быстро возрасло.

[2] То-есть с возрастанием p объемы будут менее быстро уменьшаться, чем по закону Мариотта, а следовательно, с возрастанием p произведение $p \cdot v$ будет возрастать, а не уменьшаться.

чем следует по указанному закону. Если бы, не превращаясь в жидкость, они продолжали следовать этому закону, или если бы уплотнялись более, чем он указывает, то их плотность при высоких давлениях достигла бы и превзошла бы плотность жидких и твердых тел. Так, например, под давлением одного метра ртути литр кислорода весит около 2 граммов, следовательно, по Мариоттову закону при 500 метрах давления плотность сжатого кислорода достигла бы плотности воды, а при 7000 метрах давления — плотность сжатого кислорода превзошла бы и плотность ртути. Но такой плотности не сгущенные в жидкость газы достичь, конечно, не могут, потому что: 1) они все имеют малый атомный и частичный вес, например, для кислорода атомный вес = 16, частичный 32, а тела значительной плотности встречаются только между такими, которых элементы обладают бо́льшим атомным весом, например, для ртути 200, золота 197, свинца 207, урана 240 [1] и их соединений. 2) Химические (соединение, растворение) и другие молекулярные процессы сближают атомы тел такими сильными давлениями, каких мы едва ли можем достичь механическими способами, чему доказательство видим, например, в том, что газы, не сгущаемые в жидкость механически, легко дают жидкие и твердые соединения, а между тем, исследуя эти последние, находим, что и при сжатии в жидкость плотность таких соединений не велика. Так, например, азотная кислота HNO^3 есть жидкость, составленная из трех несгущаемых газов и имеет плотность около 1,5, которая не высока. Только для легких простых тел соединения их с кислородом тяжелее самых простых тел. 3) Приняв в соображение указанную мною зависимость свойств элементов от их атомного веса, [2] должно думать, что если бы кислород и азот были сгущены в жидкость, то они представляли бы объем атома, бо́льший, чем для углерода, и меньший, чем для натрия, от 8 до 14. Судя по этому, их удельный вес в жидком состоянии был бы не более 2,0—1,0, а если бы, оставаясь газообразными, эти вещества следовали закону Мариотта при больших давлениях, то при 2000 атмосферах они имели бы уже бо́льшую плотность, чем 2,0 (по отношению к воде) и тогда мы бы имели невероятный случай образования паров, более тяжелых, чем жидкость, из коей происходит пар. 4) Таких изменений в плотности, какие достигаются изменением давлений, можно достигнуть и изменяя температуру, а сжатие (коэффициент расширения) при охлаждении, как известно, уменьшается для всех хорошо исследованных тел, [3] особенно жидких, почему при сильнейшем охлаждении они не дойдут до нулевого объема, а потому невероятно допустить это и для газов; следовательно, и при механическом сдавливании должен быть предельный объем, которого тело не превзойдет

---

[1] См. мою статью о законе периодичности. Журн. Русск. Химич. Общ. 1871 и Liebig's Annalen Supplement-band 1871 VIII.

[2] См. предшествующую цитату, труды 2-го Съезда Естествоиспытателей и Berlin. Berichte 1871. 348.

[3] Даже становится отрицательным, как то видим для воды, а по Физо и для некоторых твердых тел.

или, говоря реальнее: как коэффициент сжатия от охлаждения уменьшается, так и сжатие от давления должно уменьшаться при усиливающемся давлении. Только при таком представлении несгущаемые в жидкость газы не составят парадоксального исключения из всех других тел, для которых должно допустить предел сближения частиц как охлаждением, так и давлением.

§ 6

Эти спекулятивные соображения не позволяют допустить мысли о возможности безграничного уплотнения газов, не превращающихся в жидкость, а потому сжатие газов, идущее сперва более или менее близко по закону Бойль-Мариотта, при некотором давлении *должно* уменьшиться и, следовательно, все постоянные газы должны при некотором значительном давлении *сжиматься менее, чем следует по Мариоттову закону*, [1] как то и воспроизводится в упомянутых опытах Румфорда и Наттерера. Итак, хотя при малых давлениях газы и близко следуют закону Мариотта, но есть повод думать, что они будут сгущаться менее, чем следует по этому закону при некотором высоком давлении, если не превратятся в жидкость; как стали бы они менее сжиматься и тогда, когда превратились бы в нее, хотя бы при некотором малом сдавливании газы и уплотнялись значительнее, чем следует по закону Мариотта. Следовательно, если возьмем такой газ, как воздух, и сочтем для него справедливыми данные Реньо, то получим следующую зависимость между плотностью и давлением. Исходя от атмосферного давления и идя выше, сперва ординаты кривой, выражающей зависимость плотности от давления $d = F(p)$, будут быстро возрастать и притом почти пропорционально давлению, следовательно, касательная к кривой будет проходить почти чрез начало координат. Если бы газ следовал точно закону Мариотта, то получилась бы прямая, проходящая чрез начало координат, но так как для воздуха, судя по Реньо, сжатие больше, чем следует по закону Мариотта, то касательная к кривой будет образовать с осью абсцисс (по коей отложены давления) угол, бóльший, чем прямая, отвечающая Мариоттову закону, и станет пересекать ось абцисс в ее положительной ветви. По мере возрастания давлений этот угол, судя по данным Реньо, уменьшается, а судя по изложенным выше спекулятивным соображениям, как и по данным Наттерера, при высоких давлениях касательная к кривой образует угол с абсциссою, меньший, чем прямая, отвечающая закону Мариотта, и приближается к некоторой предельной прямой (асимптоте), пересекающей ось абсцисс в ее отрицательной части и

---

[1] Этот предположительный вывод прямо противоречит выводу Реньо (Relation I—414), который считает, что даже и водород, при некотором большом давлении, станет сжиматься более, чем следует по закону Мариотта.

ординатную ось в положительной части. [1] Поэтому должно быть место перегиба кривой, где касательная проходит через начало координат, и при соответственном давлении воздух следует закону Мариотта. Чтобы найти это место кривой, исследуем не прямо зависимость плотности d от давления p, а ту функцию, которую представляет частное из плотности на давление, то-есть найдем $\frac{d}{p} = f(p)$. Если бы воздух следовал закону Мариотта, то $\frac{d}{p}$ было бы постоянною величиною, то есть функция выражалась бы прямою, параллельною оси абсцисс. Если сжатие больше, чем по Мариоттову закону (случай тех сравнительно малых давлений, которые наблюдал Реньо), то $f(p)$ будет восходящею кривою, если же сжатие воздуха меньше, чем следует по закону (то-есть, плотность увеличивается медленнее, чем возрастают давления — случай больших давлений, наблюдения Наттерера), то кривая $\frac{d}{p} = f(p)$ будет нисходящею, [2] а то место, где восходящая кривая переходит в нисходящую, есть искомая точка; она отвечает тому давлению, при коем воздух следует закону Мариотта, и есть наибольшее значение ординат кривой, отвечающей $\frac{d}{p} = f(p)$. Такое место кривой очевидно лежит за теми пределами давлений, до которых дошел Реньо, но не далеко, а потому возьмем только немногие из данных Наттерера.

Не привожу всех подробностей расчета, а сообщу здесь только сущность приема, употребленного мною.

Данные Реньо для сжимаемости воздуха перечислены мною для одной температуры 5°, пользуясь коэффициентами расширения того же наблюдателя, затем под давлением 0,76 метров вес литра воздуха принят за 1,2699 при 5°, а потому при p = 0,76 значение $\frac{d}{p} = 1{,}6709$ и вот численный результат частных интерполирований, произведенных по способу наименьших квадратов, по опытам Реньо для воздуха:

---

[1] Вся совокупность данных Реньо и Наттерера показывает, что зависимость $d = F(p)$ близка к гиперболической. Одною асимптотою для этой гиперболы служит прямая, отвечающая закону Мариотта (но для ее определения не достает данных при давлениях, меньших атмосферного), а другою—та прямая, которая почти выразит сжимаемость газа при очень высоких давлениях. Попытки определить эту гиперболу по данным Реньо и Наттерера были выражены мною графически и довольно близко отвечали наблюдениям, но так как в точности данных Наттерера и даже Реньо есть повод сомневаться, то я и не привожу результатов сделанных мною расчетов, однако думаю, что гиперболическая кривая может лучше всякой другой кривой 2-го порядка отвечать закону изменения плотности с давлением.

[2] Рассматривая не $\frac{d}{p}$, а pv или, что все равно, $\frac{p}{d}$, очевидно будем иметь обратное направление кривых; опыты Реньо для воздуха дают pv, уменьшающееся с возрастанием p, для одного водорода pv возрастает, а опыты Наттерера дают произведение pv для всех газов, возрастающее с возрастанием давления.

Давление в метрах ртутного столба при 0° . .	$p =$	1	2	4	8	13	19	20
Вес одного литра воздуха в граммах . . .	$d =$	1,6715	3,3484	6,7144	13,473	21,97	32,24	33,955
Значение функции по данным Реньо $\frac{d}{p}$ 1 000	$=$	1671,5	1674,2	1678,6	1684,1	1690,0	1696,8	1 698

Исходя из того, что $\frac{d}{p}$ 1 000 при давлении 1 атмосферы $=1670{,}9$, и пользуясь таблицами Наттерера, вычислим затем следующие данные:

Давление в метрах ртутного столба при 0°	$p =$	80	100	200	400	1 000	2 000
Вес литра воздуха при 5° под давлением p в граммах по Наттереру	$d =$	132,56	163,08	311,5	514,7	739,6	906,6
Значение функции $\frac{d}{p}$ 1 000	$=$	1 657	1 631	1 557	1 287	740	453

Из этих данных очевидно, что значение $\frac{d}{p}$ у Реньо возрастает, а у Наттерера уменьшается с возрастанием p, то-есть, между 20 и 80 метрами давления лежит точка перегиба кривой. Чтобы найти ее, возьмем значения $\frac{d}{p}$ при 1, 20 и 100 метрах давления. Тогда найдем для давлений от 1 до 100 метров $f(p) = \frac{d}{p}\,1\,000 = 1669{,}7 + 1{,}868\,p - 0{,}02255\,p^2$. Поэтому наибольшее значение функции соответствует давлению $p = \frac{1{,}868}{0{,}02255} = 41{,}4$ метра. Хотя формула эта удовлетворяет данным Реньо, но она мало применима к данным Наттерера. Взявши иные данные из Реньо и Наттерера, найдем и другое положение точки перегиба кривой, но она все-таки должна существовать, если справедливы данные Реньо и вышеприведенные соображения. Так как ни в тех, ни в других, без новых более точных данных, нет повода сомневаться, то необходимо принять: *что при некотором значительном давлении, отвечающем точке перегиба кривой* $\frac{d}{p}$, *такой газ, как воздух, следует закону Мариотта, при меньшем сжимается*

более, чем следует по закону, а при бо́льшем давлении — меньше, чем следует по закону. Это заключение может быть выведено из совокупности чисел Реньо и Наттерера, а так как, судя по предыдущему, есть повод сомневаться в некоторой мере даже в точности чисел Реньо, то рождается необходимость подтвердить существование упомянутой точки перегиба другими опытами. Такое подтверждение неожиданно нашлось в числах из недавних наблюдений Андриуса [1] над углекислотой, хотя цель и направление опытов этого английского ученого и были совершенно иные, чем задача, занимающая нас. Андриус нашел, что при температуре выше 31° углекислота никаким сдавливанием не превращается в жидкость. Для своих наблюдений Андриус сжимал в двух узких калиброванных трубках единовременно: в одной воздух (это есть закрытый манометр, дающий давления) а в другой углекислый газ при разных температурах, и замечал объемы. Берем один из его рядов, соответствующий температуре 32,5°, и, заметив, что литр углекислого газа при давлении 1 атмосферы при 32,5° весит 1,7653 гр., под давлением 1 метра весит 2,323 гр., найдем ту функцию $\frac{d}{p}$ 1000, какую находили и в предшествующем расчете.

По данным Андриуса			*Вычислено*	
Давление в атмосферах, судя по сжатию воздуха	Число объемов углекислого газа, заключающихся в одном объеме при $T = 32{,}5°$	Вес 1-го литра сжатого углекислого газа в граммах	Давление в метрах при 0°	Искомая функция
56,8	82,72	146,02	43,16	3 380
59,4	88,94	157,00	45,14	3 478
62,2	96,41	170,20	47,27	3 600
65,4[2]	106,0	187,12	49,70	3 765
72,6	135,1	238,50	55,18	4 322
76,8	161,2	248,57	58,37	4 875
81,6	228,0	402,49	62,02	6 490
90,1	373,7	659.70	68,48	9 633
93,3	387,9	684,75	70.91	9 657
100,3	411,0	725,54	76.23	9 518
108,6	430,2	759.43	82,54	9 201

Из этого видно, что при давлении от 69 до 76 метров для углекислого газа функция $\frac{d}{p}$ достигает своего наибольшего значения, и, как ни парадоксален на первый взгляд этот вывод, при этом давлении углекислый газ, не способный (при взятой температуре) сжиматься в жидкость, следует закону Мариотта; при высших давлениях сжатие менее, а при низших более, чем следует по закону Мариотта. Поэтому в опытах Андриуса находим подтверждение выведенного мною выше по

[1] Philos. Transact. 1869. II. Pogg. Annalen, Ergänzungsband V (1870), p. 64.
[2] [В подлиннике опечатка: 56,4 *Прим. ред.*].

спекулятивным соображениям и по опытам Реньо и Натгерера заключения о существовании некоторого высокого давления, при коем справедлив закон Мариотта.

§ 7

Если, как указано выше, нельзя вполне доверять существующим по ныне опытам над сжимаемостью газов, если есть повод сомневаться в точной применимости Бойль-Мариоттова закона даже при малых давлениях, если должно думать, что при высоких давлениях этот закон не будет применим и, наконец, если должно ждать, что при некотором значительном давлении закон этот будет временно выражать сжимаемость газов, то, должно сознаться, наши понятия о газах претерпят некоторое изменение, хотя бы часть вышеизложенных соображений и оказалась при новой опытной проверке не отвечающею действительности. Итак, задачи, представляющиеся наблюдателю при знакомстве с вопросом об отношении между упругостью и плотностью газов, суть:

1. При малых, возможных для исследования, давлениях требуется узнать степень применимости Бойль-Мариоттова закона, ибо нет наблюдений этого рода.

2. При возможно больших давлениях необходимо с большею, чем было до сих пор, точностью убедиться в мере отступлений от Бойль-Мариоттова закона.

3. Наблюдения Реньо должно повторить со всеми возможными для нашего времени предосторожностями, дабы достигнуть точности, большей, чем та, какую имел этот для своего времени точнейший наблюдатель.

4. Если есть давления, при коих газы точно следуют Мариоттову закону, то их следует найти для разных газов.

Для разрешения этих задач мне кажется особенно полезным направить исследование на следующие пункты:

1) Числа Реньо показывают уже уменьшение изменения функции $\frac{d}{p}$ с возрастанием давления, [1] а потому опыт должен показать существование [2] такого давления, при коем $\frac{d}{p}$ достигает наибольшего значения, если будут взяты несгущаемые газы. Для этого, взявши воздух, или составляющие его газы, или окись углерода и т. п., следует определить отступления от Мариоттова закона при давлениях до 70 или 80 атмосфер. Во второй части этой главы я излагаю приемы, которыми предполагаю придать определениям этого рода надлежащую точность.

---

[1] Например, на 1 метр прибавленного давления, значение для $\frac{d}{p}$ 1000 увеличивается для воздуха при $p = 2$ на 2,4, а при $p = 16$ только на 1,1; надо ждать, что изменение это, сделавшись при некотором давлении $=0$, затем станет отрицательным.

[2] Или отсутствие, если вышеизложенные соображения или имеющиеся ныне факты не точны.

2) Если верен вывод из опытов Реньо о том, что функция $\frac{d}{p}$ возрастает все медленнее с повышением давления, то с понижением давления, должно думать, эта функция для таких газов, как O^2, N^2, CO, CH^4 и т. п., будет, вероятно, изменяться все быстрее и быстрее, а потому весьма интересно проследить отступления от Мариоттова закона при давлениях малых, особенно меньших, чем атмосферное. Определения, сделанные в этом направлении Реньо, относятся к давлениям примерно в $^1/_2$ атмосферного давления, они сделаны только попутно при других наблюдениях, притом по весовому способу, [1] который здесь наименее приличен для достижения точных чисел, ибо вес газа, при малых давлениях, очень мал. А между тем при малых давлениях, употребляя способ измерения объемов, легко можно делать еще очень точные наблюдения при разрежении, доходящем более чем до $^1/_{1000}$ первоначального объема. Необходимо при этом, для определения малых давлений, употреблять манометры с нелетучими жидкостями, более легкими, чем ртуть. Если можно считать $^1/_{10}$ миллиметра за предел несомненного измерения манометрических высот, то $^1/_{10}$ миллиметра масла отвечает $^1/_{150}$ доли миллиметра ртути, потому что масло, примерно, в 15 раз легче ртути, а $^1/_{150}$ миллиметра ртути отвечает $^1/_{11000}$ доли атмосферного давления. $^1/_{1000}$ доля атмосферного давления отвечает 0,76 миллиметра ртути или 11,4 миллиметра высоты масляного манометра. Опыты этого рода, которые я считаю наиболее настоятельно необходимыми, по этой самой причине и произведены мною вместе с М. Л. Кирпичевым, прежде других опытов над сжимаемостью газов, оттого и описание их читатель встретит ранее, чем других наблюдений.

3) Вопрос об отступлениях от Мариоттова закона становится особенно интересным по отношению к водороду, ибо Реньо показал, что этот газ сжимается от 1 до 30 атмосфер уже слабее, чем следует по закону, а именно так, судя по предыдущему, и должны сжиматься все газы, если они не переходят в жидкость. Поэтому опытным путем для водорода должно решить: a) Будет ли газ этот и при малых давлениях отступать от Мариоттова закона в том же смысле, как и при давлениях от 2 до 20 метров? b) При повышении давления выше 20 метров станет ли продолжаться все время уменьшение сжимаемости? c) Не зависит ли различие результатов опытов Реньо для водорода от результатов, полученных для других газов, от различного их отношения к стеклу и ртути? d) Каковы будут отступления водорода при низших и высших температурах?

Итак, существующие ныне опытные и спекулятивные сведения о сжимаемости газов нельзя считать достаточными для ответа на самые элементарные научные вопросы, относящиеся к этому делу, а потому для утверждения истинных понятий о сжимаемости газов, и, следовательно, и об их основных свойствах, необходимы новые исследования над упругостью разных газов.

---

[1] Relation etc. ... I—139.

Интерес таких исследований, особенно по отношению к сильно сжатым газам, возрастает еще от того, что такие газы обладают значительною силою упругости и составляют самый энергический источник для произведения движения. Артиллерия и горный промысел давно уже пользуются запасом силы сжатых газов, развивающихся при горении взрывчатых веществ, а в настоящее время и в остальной технике все чаще и чаще встречаются и возбуждаются применения, основанные на пользовании более или менее сильно сжатыми газами. Малое знание законов действия такого источника движения составляет одну из причин медленного прогресса в его применении, а с изучением этих законов вероятно область этих применений расширится. Особенно богатую будущность обещает применение сильно сжатых газов (например, водорода, развиваемого действием цинка на серную кислоту), образующихся при химических процессах, так как этим путем могут быть удобно получаемы газы, обладающие весьма большою упругостью. Вопрос о двигателе, имеющем малый объем и вес, поднимавшийся по поводу вопроса о движении аэростатов, подводных судов и т. п., по моему мнению, разрешается проще всего применением сильно сжатых газов, особенно водорода.

§ 8

Современные задачи учения об упругости газов, важные для теории и практики и бывшие уже предметом исследования столь многих ученых, представляют множество трудностей для их решения опытным путем, потому что требуют весьма точных методов наблюдения и в то же время сильных, если можно так выразиться, средств. Те методы наблюдения, какими до сих пор располагали исследователи упругости газов, оказываются недостаточными для решения задач, представляемых вопросом, как это было уже выше показано и как будет отчасти развито в этой и следующих главах, а потому, приступая к описанию опытов, предпринятых мною, при содействии Императорского Русского Технического Общества, над упругостью газов, считаю не излишним, в самом начале, указать на такие изменения в способах наблюдения, какие, по мнению моему, должны обеспечить возможность решения задач, представляющихся в учении об упругости газов. При этом я ограничусь, однако, преимущественно указанием приемов для определения сжимаемости газов от 1 до 80 атмосфер, потому что методы наблюдения сжимаемости при меньших давлениях, чем атмосферное, вовсе не выработаны, а при бо́льших, чем 80 атмосфер, они будут представлять сходство с теми, какие будут употреблены для меньших давлений. Сжимаемость газов под давлением выше атмосферного была предметом многих наблюдений, а потому методы, предлагаемые здесь, могут быть сравнены с теми, которые употреблялись прежними исследователями. Следуя указаниям моих славных предшественников в области изучения упругости газов, я старался развить и усовершенствовать их способы наблюдения, сообразно современным успехам физико-химических знаний, и считаю свои предположения о приемах наблюдения, излагаемые вслед за сим и предшествовавшие началу опытов, ближай-

шим поводом к оправданию смелости с моей стороны взяться за столь сложные и трудные наблюдения, какими представляются наблюдения над упругостью газов. Если бы в числе моих предположений не было таких, которые представляли бы сравнительно легкую возможность осуществления и в то же время не обещали бы подойти ближе, чем до сих пор, к решению задач учения об упругости газов, то мне не было бы повода приступить к такой работе, которая не по силам для средств единичного исследователя. Излагая в начале отчета об опытах свои предположения, я имею, сверх того, целью предоставить читателю возможность судить о том, насколько оправдаются предварительные соображения действительностью. Не только тогда, когда эти предположения были напечатаны в первый раз (1872 г. см. выноску на стр. 1 [= 235]), но даже и теперь (1874 г.), когда часть опытов уже выполнена, я сам еще не могу судить о полной практической применимости всех ниже предлагаемых приемов, хотя часть их уже оказалась удовлетворительною на деле. Считаю сверх того неизлишним заметить, что И. Р. Техническое Общество оказало свое содействие исполнению моих предположений, конечно, по тому поводу, что они были обставлены указанием практических приемов для достижения цели изучения упругости газов, и уже по этой одной причине считаю полезным в начале отчета об опытах воспроизвести мои предположения об их производстве.

§ 9

Цель предполагаемых опытов составляют возможно точные числа, выражающие зависимость изменения п л о т н о с т е й, т. е. весов при данном объеме, или о б ъ е м о в при постоянном весе разных газов от д а в л е н и й, под коими они находятся. Поэтому для достижения ее необходимо иметь: 1) точные средства для измерения давлений как атмосферного, так и меньших и в особенности бо́льших, чем атмосферное; 2) средства для сжатия газов до значительных плотностей; 3) средства для сохранения сжатых газов, дабы можно было определить в таком газе и давление, и плотность; 4) точные средства для определения плотностей газов, то-есть их веса и объема. Успех исследования, точность результатов и возможность их повторения и поверки зависят не только от выбора этих средств, но также и от многих других причин: от однородности и чистоты газов, от постоянства и определения температур, от точности мерительных приборов, от определения влияния поверхности сосудов на плотность и от многих других. Эти последние причины однако имеют второстепенное влияние, не требуют, повидимому, новых специальных приемов, для них возможно пользоваться уже известными способами, применяя некоторые улучшения, сообразные делу, а потому я остановлюсь на них только вкратце, а главное внимание обращу на первые четыре средства исследования, так как от недостаточности их зависят преимущественно те недостатки в существующих исследованиях, какие мы видели в предшествующем изложении. Это можно доказать исследованием над зависимостью между определением меры отступления от Бойль-Мариоттова

закона и величиною погрешностей в отдельных частях наблюдения, но я излагаю этот последний предмет в особой главе (глава 2-я), потому что и без того считаю очевидным преимущественное значение первых четырех средств сравнительно с другими.

Прежде всего должно заметить, что для наблюдений над сжимаемостью газов под высокими давлениями необходимо предпочесть *весовой способ* объемному по многим причинам, а именно: 1) потому что объемные определения возможно производить с удобством и точностью только в больших стеклянных сосудах, [1] а такие больших давлений не выдерживают; 2) объемные определения все-таки в сущности сводятся на весовые, так как емкости определяются весами; 3) весовой способ удобоприложим к сильно сжатым газам, ибо тогда они имеют значительную плотность: 4) каждое отдельное наблюдение в весовом способе совершенно самостоятельно, не зависит от предшествующих определений, тогда как в объемном способе первое наблюдение объемов должно быть сделано при таком давлении, при котором плотность газа уже известна, а второе определение одно только и служит как новое наблюдение, поэтому, строго говоря, в каждом объемном определении есть двойная погрешность; 5) известно, что определение значительных объемов и при этом малых их долей менее точно, чем определение значительных грузов и малых их частей, хотя бы доли, наблюдаемые по объемам, [2] и были меньше тех, какие наблюдаются по весу.

По этим причинам мне кажется предпочтительным употребить объемный способ только при давлениях, меньших, чем 1—5 атмосфер, а все прочие определения сделать весовым способом. Притом лучше сделать *немногие, но точные и повторенные определения* при нескольких значительно разнящихся давлениях, чтобы по возможности не прибегать к способу наименьших квадратов для извлечения окончательного результата, чем делать многие наблюдения при близких, но различных давлениях, как то замечается в большинстве бывших исследований. Умножение числа наблюдений, при разнообразных давлениях, близких друг к другу, представляет не только многие затруднения для исследования, но и увеличивает погрешность вывода. Так, например, мне кажется совершенно достаточным определить плотности газов при давлениях, близких к 0,0001, 0,001, 0,1, 0,2, 0,5, 0,76 метра ртутного столба, затем при давлениях 3, 6, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 54, 60 метров, и если для каждого из этих давлений добыть три или четыре числа, погрешность коих по роду наблюдений сперва должна быть известна, то, сравнивая эти наблюдения друг с другом, можно определить эмпирическую зависимость d от p при всех давлениях до 60 метров. Притом необходимо теоретически (по

---

[1] Весьма важно испытать объемный способ в больших металлических сосудах, снабженных узкими стеклянными трубками для определения объемов.

[2] В капиллярных трубках (например, в термометрах) при отчитывании трубою ясно наблюдают изменения в объеме, равные 0,0000001 куб. сант., а такой объем воды невозможно определить взвешиванием, ибо для чувствительнейших весов должно ныне счесть за предел возможных для определения величин 0,0000010 грамма, то-есть тысячную долю миллиграмма.

сумме погрешностей всех действий) и практически (по мере различия результатов) определить *меру точности каждого данного*, чтобы иметь залог верности результата. Недостаток знания степени точности наблюдений составляет главнейшую причину того, что из множества существующих ныне наблюдений над сжимаемостью газов нельзя еще вывести таких чисел, выражающих сжимаемость газов, предел погрешности которых был бы известен.

Указав главнейшие соображения, руководившие меня в проектировании наблюдений, перейду теперь к описанию приборов.

§ 10

Приборы для определения давления. Первое место принадлежит *барометру*, потому что исходным пунктом всех определений должно служить знание плотностей при атмосферном давлении. Если счесть 0,1 миллиметра за предел точности в наблюдении барометрических высот, то знание плотности воздуха при давлении 760 миллиметров будет точно только на 0,00016 гр. на литр, или, если взять сосуд в 15 литров, погрешность будет 0,0024 грамма, а взвешивание можно сделать гораздо точнее. Притом барометрические показания входят и во все определения высших и низших давлений, производимые при помощи открытых манометров, а известно, что согласие показаний барометров в пределе точности измерения высот ныне считается недостигнутым. Реньо признает [1] 0,1 мм. за предел точности определения барометрических высот; многие физики, геодезисты и астрономы допускают еще и бо́льшую погрешность. [2] Для

[1] Relation etc. I—69.

[2] Главные причины малого согласия барометров между собою, сколько ныне известно, суть: 1) Не обращают или мало обращают внимания на точное сличение шкал, на изменение их длины от температуры и т. п. 2) Употребляя барометры с чашкой, не исправляют на давление мениска в чашке; употребляя сифонный барометр, иногда неосновательно считают мениски равными. 3) Не обращают надлежащего внимания и не измеряют иногда высоту менисков, а от нее столько же зависит капиллярное давление, как и от радиуса трубки. 4) Для поправки на давление мениска пользуются ошибочными таблицами, о чем писали еще Pohl und Schabus в Sitzungsberichte d. Akad. in Wien 1852, IX—834. 5) Сведения о давлении мениска ртути (депрессии) вообще очень еще недостаточны. 6) При падении барометра верхний мениск иногда становится плоским и даже вогнутым, а потому следует все измерения производить при восходящем движении ртути, что легко достичь. 7) Не принимают во внимание давления воздуха и ртутных паров, находящихся в пустоте. 8) Температуру ртути барометра иногда определяют в таких условиях, таким термометром и так помещенным, что он не имеет температуры ртути в барометре. 9) Для поправки на температуру ртути иногда довольствуются заведомо недостаточно точными старыми коэффициентами расширения ртути. Слагаясь между собою, эти условия и делают барометрические наблюдения несогласными между собою, часто до 0,5 и более миллиметра. При проектировании своего барометра я имел в виду все вышеуказанные условия.

Г. Вильд в III томе Метеорологического сборника (1874 г.) рассматривает условия барометрических наблюдений; мне весьма было приятно встретить то обстоятельство, что во всех главных пунктах соображения, развиваемые директором Спб. метеорологической обсерватории, совпадают с моими соображениями, высказанными за два перед тем года в этом примечании.

устранения известных мне недостатков я предполагаю устроить свой барометр прежде всего с *трубчатою шкалою*, которую сличу с нормальным своим метром при некоторой температуре, до которой всегда могу довести свою шкалу, пропуская чрез трубку воду желаемой температуры. Компарируя высоту ртутного столба с делениями шкалы, мы избегнем многих погрешностей в измерении. Этот же прием компарации я предполагаю применять и во всех других случаях определения давлений высотами столбов ртути.

Чтобы соединить удобства чашечного и сифонного барометров, лучше устроить чашечный, но с чашкою, герметически закрываемою крышкою (заливаемою мастикою) и притом так, чтобы чрез крышку чашки проходила барометрическая и другая более короткая трубка, отвечающая сифонной. [1] Прибавляя и убавляя в ней ртути чрез особые боковые трубки (идущие от сифонной трубки), будем иметь возможность постоянно делать наблюдения при восходящем или нисходящем положении ртути в обеих ветвях барометра, что сделает определения согласными, потому что содействует образованию мениска, всегда однообразного по форме, [2] но высоту которого все-таки необходимо мерить. При этом железная шкала будет стоять в средине между стеклянными трубками и чрез это облегчится и сделается точным катетометрическое определение высот барометра. Чтобы измерить упругость воздуха, находящегося в пустоте, ее необходимо калибровать и, возвышая и понижая уровень в сифонной трубке, замечая при этом объем пустоты и высоту баромéтра, можно определить (как делают Араго, Вильд и др.) ту поправку, которую должно ввести на упругость оставшегося воздуха, *считая его следующим при малых давлениях Мариоттову закону*. Сверх того следует сделать поправку на упругость ртутных паров. Для полного достижения правильности в поправке на температуру ртути в барометре я предполагал сперва всю его часть над чашкою окружить водяною ванною, но полагаю ныне, что будет достаточно устроить из части барометрической трубки большой термометр с цилиндрическим резервуаром, который, помещаясь на средине высоты барометра, будет менять свою температуру так же, как и барометр.

---

[1] В недавнее время Г. Брауэр устроил для главной метеорологической обсерватории, по идее г. Вильда, барометр с подобным этому устройством. Ныне этот прибор описан в III томе Метеорологического сборника И. Академии Наук (1874 г.) стр. 23, и читатели могут судить о его устройстве.

[2] Таким приемом избегается возможность иметь большие неравенства в капиллярной депрессии. Значение этого приема, указанного мною, было оправдано с тех пор г. академиком Вильдом, ибо он дает такой же совет и то же устройство части для приливания ртути, как и я. Считаю небесполезным заметить здесь, что такой прием имеет наибольшее значение при употреблении барометров с узкими трубками, и особенно прокипяченных барометров, а не таких широкотрубчатых, каков нормальный барометр нашей обсерватории, потому что в широких трубках вся депрессия и без того мала, а изменения ее нечувствительны. В более тонких обыкновенных барометрах она значительна, и ее изменения велики, как видно из исследований над депрессиею, сделанных в моей лаборатории г. Иорданским. Эти исследования по их окончании будут опубликованы.

Устроив два [1] или несколько таких барометров, сделавши особые предварительные наблюдения над отношением высоты мениска к его давлению, я получу возможность узнать степень точности своих барометрических отчетов и надеюсь достичь до точности, бо́льшей, чем та, какую Реньо счи́тал за предельную.

§ 11

На этих началах и проектирован мною барометр, которого дальнейшие детали без рисунка не могут быть ясно описаны, а потому перехожу к другому, важнейшему прибору, необходимому для исследований, а именно к *манометру для высоких давлений*. Если бы я не

[1] Обращаю внимание на это обстоятельство, имеющее весьма важное значение для получения точных барометрических данных, потому что малые поправки барометрических высот (на депрессию, упругость воздуха в пустоте, температуру ртути и т. п.) не достаточно хорошо известны, чтобы можно было пользоваться ими с полной уверенностью, которая получится только тогда, когда два барометра, наблюдаемые единовременно, по исправлении их показаний по времени и обстоятельствам наблюдения, дадут согласные данные. Г. Вильд при устройстве своего нормального барометра упустил из виду это обстоятельство, руководствуясь по примеру других обсерваторий показаниями одного нормального барометра. Возлагая ответственность за точность получаемых им нормальных чисел на него самого, считаю, что для пользы дела должно бы устроить на метеорологической обсерватории хотя два нормальных барометра, отдельно изучить их и сличить между собою, чтобы знать степень точности нормальных барометров. В особой главе, посвящаемой мною устройству барометров, будут указаны легкие способы приготовления широкотрубчатых барометров, и я думаю, что наша метеорологическая обсерватория оказала бы не маловажную услугу науке, коей она посвящена, если бы установила окончательно методу приготовления нормальных барометров. При моих исследованиях я должен был очень много времени посвятить вопросу об устройстве и поправках нормальных барометров, ибо от того зависит вопрос о сжимаемости при малых давлениях, а между тем это дело надобно было бы получить законченным от метеорологических обсерваторий, ныне по справедливости столь распространяемых. Наша центральная обсерватория сделала в этом отношении едва ли не более других, оттого от нее и можно ждать окончательного решения вопроса о барометрах. В моих исследованиях изучение барометров явилось, как дополнительная, хотя необходимая работа, было необходимо, как средство; на метеорологической обсерватории такое изучение есть цель учреждения, а потому мы вправе ждать от него труда, обстановленного всеми задатками точности. Этого нельзя сказать, когда для изучения взят один прибор, а прочие просто сличены с ним, а не изучены отдельно. Будем же ждать, что наша обсерватория опередит в этом отношении другие. Возможность и относительную легкость такого изучения барометров я могу засвидетельствовать, потому что неоднократно сличал по два и по три отдельно изученных барометра. Притом, помимо одновременного изучения по крайней мере двух нормальных барометров, нет уверенности в результате по отношению к влиянию времени, как то будет видно при дальнейшем описании барометров, приготовленных мною. Здесь уместно заметить, что нечистота ртути, о которой говорит и сам г. Вильд (стр. 42—50) сама по себе делает сомнительными показания нормального барометра нашей обсерватории не по тому одному, что она изменяет плотность ртути (что рассматривает г. Вильд), но потому уже, что она (стр. 42) пачкает стенки барометрической трубки и чрез то препятствует ясности отчета и правильности в образовании мениска. В бытность мою на нашей метеорологической обсерватории (весною 1872 г.) я видел в открытой ветви барометра такое количество нечистот, которое, судя по моей практике, препятствует отчетливости наблюдений даже до 0,05 мм., а г. Вильд считает показания своего нормального барометра точными до 0,01 миллиметра.

ожидал преодолеть встречающиеся здесь трудности новыми способами, допускающими точность и удобство, то конечно не стал бы и проектировать всю совокупность предлагаемых опытов. Трудность здесь зависит от того, что другого точного способа измерения давлений, кроме прямого измерения высоты ртутного столба, еще нет, а прямой ртутный столб, какой употребляли до сих пор все исследователи, начиная с Бойля до Реньо, при значительных высотах, представляет разные причины для неточности в измерении и множество неудобств, например, неудобство соблюдения равных температур, необходимость перемещения наблюдателя и приборов на разные высоты и т. п. Реньо, употреблявший ртутный столб высотою в 22 метра, едва ли не достиг уже возможного предела, при котором однако уже вкрались погрешности от того, что наблюдения в верхних частях пришлось делать без пособия катетометра, а циркулем и на глаз. Для определений, доходящих до 80 атмосфер, пришлось бы иметь столб ртути в 61 метр, а потому нужно было бы возводить особые постройки и все-таки в точности результатов можно было бы сомневаться. Применяя давно известный, когда-то употреблявшийся в технике, открытый — *сложный манометр*, где столбы ртути перемежаются со столбами воды, я думаю иметь удобное средство достигнуть точного определения разнообразных давлений, не переменяя места катетометров, и доходить до таких давлений, которые только могут выдерживать стеклянные трубки, если приспособить такой манометр к точным наблюдениям. Чтобы показать значение предлагаемой мною системы определения высоких давлений, я опишу в кратких чертах тот экземпляр манометра, который был мною проектирован при развитии предположений об определении сжимаемости газов, и затем укажу способы, какими предполагаю итти далее. Предполагаемый манометр назначен для прямых определений давлений, доходящих до 80 атмосфер, то-есть, соответствует прямому манометру высотою в 61 метр, а имеет высоту только около $3^1/_2$ метров. Он состоит из 40 вертикальных стеклянных трубок этой длины,[1] последовательно соединенных между собою в верхних и нижних частях. Трубка № 1 идет к насосу, доставляющему сгущенный газ, и к сосуду, его содержащему. В ней находится небольшое количество ртути. Нижний конец трубки залит мастикою в соответственном отверстии нижнего стального бруса манометра. В этом брусе находится горизонтальное отверстие, идущее поперек бруса и сообщающее трубку № 1 с трубкою № 2. Трубка № 2 наполнена ртутью, а верхняя часть водою. Эта часть закреплена в верхний стальной брус манометра и сообщается косым, проделанным в брусе, горизонтальным клапаном с трубкою № 3, которая стоит рядом с трубкою № 1. В трубке № 3 вся верхняя часть занята водою, а внизу находится ртуть; она сообщается особым поперечным горизонтальным каналом нижнего бруса с трубкою № 4,

[1] Трубки предполагаются длиною каждая около 2 метров, следовательно, каждая вертикальная трубка манометра составится из двух, скрепляемых между собою стальными охватами, залитыми мастикою. Вопрос о приготовлении мастик и скреплении ими приборов столь важен для практики физико-химических опытов, что я посвящаю ему особое место в этой книге.

которая стоит рядом с трубкою № 2, и, как эта, наполнена почти до верху ртутью. Так идут далее и все трубки до трубки № 40, которая вверху открыта и содержит ртуть.

Итак, получаются два ряда трубок, в каждом ряде по 20 трубок. В нечетных трубках ртутный мениск находится внизу, и все эти трубки наполнены водою, а в четных трубках, видных с другой стороны манометра, ртутный мениск находится вверху. Верхний конец этих трубок занят водою. Если весь манометр будет в деле, то им можно мерить давление, равное 20 высотам ртутных столбов длиною около 3,3 метра или 66 метров ртути, но так как в 19 трубках столбы воды такой же высоты действуют в обратную сторону, то из высоты 66 метров надо вычесть высоту ртутного столба, отвечающего водяному столбу высотою в 19.3,3 или в 62,7 метра. А так как ртуть в 13,5 раз (здесь взято приближенное число, конечно в действительности будет взято точное число) тяжелее воды, то давление 62,7 метров воды отвечает давлению 4,6 метров ртути, а потому весь прибор даст возможность мерить давление = 66 — 4,6 = 61,4 метра ртути. Чтобы возможно было применять манометр, трубки должны выдерживать столь значительные давления, а судя по наблюдениям Шевандье и Вертгейма,[1] определившим, что предельное давление хорошо закаленного стекла более 1 кило на квадратный миллиметр сечения, можно расчесть, что трубки диаметром внутри 6, а снаружи 12 миллиметров выдержат такое давление. Более толстостенные трубки не только трудно изготовлять одинакового диаметра и равномерной толщины, но и трудно закаливать, а потому со стеклянными трубками я считаю безопасным и удобным делать определения не более, как до 100 атмосфер давления. При диаметре отверстия в 6 миллиметров легко определить высоту мениска и сделать поправки, необходимые для точности результата, о чем здесь я не стану распространяться. В верхнем и нижнем брусьях манометра сделаны приспособления, понятные без дальнейшего описания, допускающие возможность приливать и отливать ртуть и воду в каждую трубку, а потому есть возможность взять такие количества этих жидкостей, чтобы все верхние мениски ртути стояли приблизительно на одной высоте, а также и все нижние мениски ртути. Такое, конечно, приближенное равенство высот менисков значительно облегчает измерения высот каждого столба ртути и представляет возможность придать этим измерениям желаемую точность. Для этой цели около трубок помещается вертикальная железная трубка, длиною в $3^1/_2$ метра, закрепленная только внизу и в средине, чтобы могла свободно расширяться. На этой трубе, могущей вращаться на нижнем подшипнике, сделается несколько круговых гладких поясов, а на них круговые тонкие реперные черты. Крайние (верхний и нижний) пояса будут на таком примерном расстоянии, какое будет между верхними и нижними менисками. Пред опытами, пропуская через трубку воду желаемой температуры, определится, по отношению к нормальному метру, расстояние реперных черт, а во время опыта катетометром, стоящим с од-

[1] Annales de Chimie et de Physique 1847(5), XIX—129.

ной стороны манометра, на которой нечетные трубки, определится расстояние от уровней нижних менисков ртути до нижней реперной черты железной трубы, а другим катетометром, стоящим вверху и обращенным к четным трубкам манометра, определится расстояние верхних менисков от верхней реперной черты железной трубки. Таким образом, во время опыта *катетометром будут измеряться только малые доли* всей высоты ртутного столба, *а бо́льшая часть высоты* столба ртути *найдется, умножая число столбов ртути* на точно определенное и сохраняющееся *расстояние реперных черт постоянной железной трубки*. Этим путем (компарированием) лучше, чем каким-либо другим, можно достичь точного измерения больших столбов ртути.

Притом и малые разности определяются *катетометрами неподвижными*, а потому допускающими точную установку. Что касается до катетометров, то их готовит для моих исследований г. Брауэр, а его катетометры должны быть считаемы за лучшие из известных. Так в изготовляемых катетометрах нониус будет давать $^1/_{100}$ миллиметра, в трубах есть окулярные микрометры, дающие возможность измерять еще точнее малые высоты (например, в наших опытах высоты менисков, расстояния от реперов и т. п.), уровни труб желательно чувствительные до 2″ (секунд). Тогда при расстоянии от катетометра до манометра $= 1^1/_2$ метрам, можно будет с уверенностью читать $^1/_{100}$ миллиметра. Предполагая погрешность на каждый столб ртути достигающею даже до $^1/_{10}$ миллиметра, при 20 столбах ртути получим погрешность $= 2$ миллиметрам на 60 метров всей длины, что составит погрешность не более $^1/_{30000}$, чего нельзя и думать достичь при измерении прямого, столь длинного, вертикального столба ртути. Притом, относительная погрешность в определении высот столба ртути не будет здесь возрастать с длиною, а точность определений будет оставаться постоянною при больших и малых высотах. Результат измерений будет исправлен на температуру ртути и воды, на сжатие их от сдавления, на разность давлений менисков, на давление атмосферы (действующее на открытый конец) и т. п., но это не требует дальнейшего обсуждения, а я считаю необходимым объяснить, как будет служить мой манометр для определения давлений, меньших, чем в 60 метров ртути, и для бо́льших, чем это, давлений.

Необходимо заметить, что с манометром, проектированным мною, возможно ждать точных чисел только тогда, когда столбы ртути и воды, раз установленные на надлежащую высоту, не станут затем значительно перемещать своего места, потому что иначе к ртути подмешается вода. Чтобы достичь этого, сообщение между трубками № 1 и № 2, после окончания определения давления, запрется особым винтом, находящимся в нижнем стальном брусе манометра, а потому, если на ртуть в трубке № 1 и станет теперь действовать одно атмосферное давление, все-таки все столбы ртути сохранят свое первоначальное положение. Подобным же путем можно оторвать и некоторую часть манометра и тогда, пользуясь одной частью манометра, определять меньшие давления, чем в 60 метров ртути. Представим себе, что мы

закрыли особым винтом, находящимся в нижней доске манометра (а таких винтов в предполагаемом манометре 12), сообщение между трубками № 5 и 6 и притом открыли сообщение верхнего конца 4 трубки с атмосферою. Тогда [1] у нас в распоряжении будет манометр, содержащий 2 столба ртути (в трубках № 2 и 4) и один столб воды (в № 3), а потому таким манометром определится давление, равное $2 \cdot 3{,}3 - \frac{3.3}{13{,}5}$ или около 6,3 метра ртутного столба, не перемещая столбов ртути, а сохраняя для них те же высоты. А чтобы достичь малой изменяемости положения столбов ртути и воды и тогда, когда накачивается воздух, сообщение между трубками № 1 и № 2 открывается лишь в то время, когда приблизительно уже достигнется желаемое давление, для чего необходимо иметь особый *манометр, дающий приблизительные показания*. Таким манометром может служить: 1) обыкновенный Бурдоновский манометр, но он представляет то неудобство, что расходует много газа; 2) открытый ртутный манометр (пиезометр), окруженный ртутью и помещенный в трубку, проводящую сжатый газ к манометру; [2] 3) удобнее же всего приблизительному манометру придать форму стальной пластинки, на которую, с одной стороны, будет действовать сдавленный газ, который станет ее выпучивать, а с другой стороны ее должно окружить резервуаром с ртутью и с капиллярною трубкою. При выпучивании пластинки ртуть в трубке будет подниматься, и это поднятие ртути покажет давление, действующее на пластинку.[3] Предварительною работою должно установить соответствие взятого приблизительного манометра с нормальным. Если же изменение упругости счесть правильным до предела упругости стали, то такой манометр можно употреблять и для приблизительного определения высших давлений, чем такие, для каких он сличен. Во всяком случае необходимо делать, при пользовании такими манометрами, поправку на влияние температуры или окружить их водою определенной температуры.

§ 12

Для точного определения давлений, незначительно превышающих 60 метров ртути (до предела разрыва взятых трубок, то-есть, примерно до 100 или 120 метров), можно довольствоваться тем же сложным манометром, который служит и до 60 м., ничего не изменяя в нем, а

---

[1] Предварительно, чрез упомянутые ранее того отверстия, должно в трубку № 4 вогнать ртуть и тем вытеснить находящуюся в трубке № 4 поверх ртути воду, затем ртуть в № 4 опять следует слить до надлежащего уровня. Во все это время сообщение между № 1 и 2 заперто.

[2] В последнее время К а й л ь т е (Comptes rendus 1874) употребил этот же способ.

[3] Манометры этого рода могут найти многочисленные практические применения, например, для определения давления пороховых газов в артиллерии, для паровых котлов и даже для барометров. Они очевидно могут иметь чувствительность, гораздо бо́льшую, чем обыкновенные анероидные манометры, ибо в этих последних меряется линейное, а здесь кубическое изменение формы упругого тела. В последнее время г. Шпаковский устроил по этой идее бароскоп, назначенный для показания барометрических давлений.

поступая следующим образом: запрем сообщение 39-ой и 40-ой трубок и откроем в воздухе верхний конец трубки № 38, тогда нашим манометром можно определить давление, равное 58 метрам ртути. В запертую снизу трубку № 40 накачаем теперь воздух (окружив трубку эту водою, дабы удержать температуру) до желаемого давления, которое и определим тем же манометром. Положим, что мы накачаем воздух до 58 метров давления. Этот воздух запрем теперь краном в верхней части трубки № 40, а потому на свободный конец манометра теперь будет действовать давление (не атмосферное, как в случае его открытого положения), равное 58 атмосферам, а потому с помощью всего нашего манометра (вновь соединив трубки № 39 и 40) можно определить давление, достигающее до 61 + 58 = 119 метров.[1] Для давлений, еще бо́льших, если опыт покажет, что трубки его выдерживают, должно калибровать верхнюю часть трубки № 40 и, сжимая в ней газ (чрез накачивание в трубку № 40 снизу ртути), определять его упругость по занятому объему. Например, замкнем в трубку № 40 100 куб. сант. газа под давлением 58 метров и сдавим этот газ до того, чтоб он занял объем 70 куб. сант. Если закон сжимаемости воздуха выше 58 метров нам уже известен, то мы узнаем, какое давление оказывает сжатый нами газ. Положим, что по этому закону окажется, что 100 объемов газа при 58 метрах сдавливаются в 70 объемов при давлении 100 метров, а потому наш манометр будет теперь служить для давления = 61 + 100, т. е. для 161 метра давления.

Но такие давления в действительности наши стеклянные трубки едва ли вытерпят, а потому для давлений выше 100 метров я предполагаю устроить второй манометр, подобный первому, но с трубками из стали, то-есть, из ружейных стволов, только одна последняя трубка этого манометра будет стеклянная. По уровню ртути в этой трубке можно судить об уровне ртути в остальных трубках,[2] а сличив этот

---

[1] Пользуясь подобным приемом можно с малым открытым манометром изучить сжимаемость газа и до весьма высоких давлений. Имеем, например, открытый манометр, отвечающий 10 атмосферам (7,6 метра высоты), определим с точностью сжимаемость до 7 метров. Открытый конец манометра закроем при давлении барометра, зная объем и температуру замкнутого воздуха; тогда на другой конец манометра можно действовать сильнее сжатым газом, и давление его определится по сумме высоты ртутного столба и упругости воздуха, давящего на верхний мениск ртути. А эту упругость мы уже узнаем с точностью, пока она достигнет до 10 атмосфер, если нам известен ранее закон изменения плотности и упругости газа до 10 атмосфер и если определим объем, какой займет запертый воздух. Следовательно, этим способом узнаем сжимаемость газа до 20 атмосфер, а теперь можно итти и далее, то есть, еще более сдавливать воздух, находящийся наверху манометра. А потому с подобною комбинациею закрытого и короткого открытого манометра можно довольно точно изучить сжимаемость газов до больших давлений. Так я и думал итти первоначально, пока не решился прибегнуть к сложному вышеописанному манометру, представляющему больше удобств и ручательств в точности. Впрочем и упомянутый здесь способ я думаю применять в предстоящем исследовании и полагаю, что другие исследователи, занимавшиеся вопросом о сжимаемости газов, не имели в виду упомянутого способа, потому что иначе наши знания о сжимаемости газов были бы вероятно более полны.

[2] В ружейном стволе возможно определять уровень ртути еще при помощи: 1) разрыва гальванического тока и 2) веса влитой ртути.

манометр с первым, можно знать, какое давление выражает высота ртути в последней трубке второго манометра. Затем, соединив первый манометр со вторым (и следующими), можно определить системою подобных манометров давления, беспредельно большие. Имея в виду в настоящее время опыты до тех только давлений, какие выдержат указанные выше стеклянные трубки, я не останавливаюсь над другими предполагаемыми мною способами точного определения более высоких давлений, но полагаю, что точное и прямое определение весьма высоких давлений возможно при средствах, доступных уже ныне для выполнения. *Если же для одного газа*, например, для водорода, *будет определен эмпирический закон сжимаемости, то при помощи закрытого манометра*, наполненного этим газом в сжатом виде, можно уже *определять и точно, и удобно давления*, встречающиеся при дальнейших исследованиях.

§ 13

Переходя к описанию средств, которые предполагаю употребить для *сжимания газов* до значительных плотностей, я должен начать с того указания, что приборы, употребленные для этой цели Реньо и Наттерером, дают уже возможность достичь желаемой цели, и мне только остается упомянуть о том, что при помощи ртутного насоса, проектирование которого взял на себя Н. П. Петров, я предполагаю сгущать газы только до давлений в 40 и около того атмосфер, потому что при высших давлениях клапаны насосов служат уже не так хорошо и в накачивании проходит очень много времени, а потому дальнейшее сжатие газа я предполагаю производить [1] при помощи стального *сгустителя*.

Этот последний, как и другие стальные части, взялся выполнить из литой стали А. А. Колокольцев на Обуховском сталелитейном заводе близ Петербурга. Сгуститель, предполагаемый мною, будет состоять из двух цельных, внутри выточенных, стальных сосудов, соединяющихся на дне стальным стволом. Каждый сосуд имеет емкость около 5 литров, формы эллипсоидальной, высотою около 46 см., диаметром снаружи около 27 сантиметров. Такие сосуды, судя по определениям г. Чернова и В. Л. Кирпичева предела упругости многих образцов обуховской литой стали, выдержат по крайней мере 700 атмосфер давления, а потому будут пригодны и для дальнейших опытов. Я предполагаю поставить один сосуд выше другого так, что когда все отверстия обоих сосудов открыты, то влитая в верхний сосуд ртуть наполнит нижний сосуд. Вольется столько ртути, чтобы весь нижний сосуд наполнился ею. Запрем теперь отверстия верхнего сосуда, а нижний сообщим одним отверстием с манометром и тем сосудом (назовем его A и положим его емкость $= 1\frac{1}{2}$ литрам), в котором должно сжать газ, а другим отверстием (оба в верхней части нижнего сосуда) с насосом, позволяющим сгустить газ до 40 атмосфер. Когда станем накачивать

[1] Подобное же средство употреблено Реньо, но у него устройство иное. Relations etc. II, стр. 557, фиг. 18, таблица VI.

газ насосом, то ртуть будет подниматься из нижнего сгустительного сосуда в верхний и сдавит в этом последнем воздух до давления немногим меньшего, чем у газа, сжатого в нижнем сосуде. Давление воздуха в верхнем сосуде можно определять приблизительным манометром, например, Бурдоновским, и по нему можно будет судить о давлении газа в нижнем сосуде. Когда давление в нижнем сосуде сгустителя и в A дойдет до 40 атмосфер, тогда, положим, газ займет $4^1/_2$ литра в нижнем сосуде, а в верхнем давление будет менее 40 атмосфер. Теперь запрем кран, соединяющий нижний сосуд с насосом, [1] и усилим каким-либо способом давление в верхнем сосуде. Тогда ртуть из него будет входить в нижний сосуд, и газ, в нем находящийся, вгонится в сосуд A. Если таким образом весь газ вгонится в сосуд [2] A, то в этом последнем давление достигнет примерно до 160 атмосфер. Если бы сосуд A, в который вгоняется газ, имел емкость около 275 куб. сантиметров, а в сгустителе содержалось бы 4,5 литра газа под давлением 40 атмосфер, то, вытеснив весь газ из сгустителя в A, можно было бы достичь в A давления в 700 атмосфер. Эти расчеты я привожу для того, что ими определяется размер сосудов, назначаемых для собирания и взвешивания сгущенного газа. Что же касается до средств, которыми в верхнем сгустительном сосуде будет увеличиваться давление выше 40 атмосфер, то ими могут служить: выделение газа, например, водорода, химическими способами, развитие паров жидкой угольной кислоты, причем потребуется нагревание верхнего сосуда, накачивание воздуха и воды или ртути в верхний сгуститель водяным нагнетательным насосом, наконец, даже горение пороховой смеси в особом сосуде, сообщающемся с верхним сгустителем. Выгода сгустителя при этом только та, что в верхний сосуд могут безопасно попадать посторонние газы, влажность и др. подмеси и они при этом не станут изменять состава газа, который находится в нижнем сосуде. Для первых предстоящих опытов, доходящих до 80 атмосфер, достаточно будет пользоваться жидкою углекислотою, как это делал отчасти и Реньо в своих исследованиях.

§ 14

Что касается до *сосудов, в которых* [3] будет собираться *и взвешиваться газ*, то при их устройстве надо принять в расчет: 1) сосуды должны быть по возможности велики, чтобы количество взвешиваемого газа было значительно; 2) они должны быть такой толщины и из такого материала, чтобы выдержали, не изменяя пластическим образом своей формы, то давление, какое имеет заключенный в них газ; 3) они должны иметь герметический запор и 4) чтобы в то же время вес их с газом не превосходил наибольшую нагрузку, допускаемую чувствительными

[1] Все краны должны быть винтовые и нажимные, ибо они держат отлично сильно сжатый газ, как это видно из всех исследований Наттерера.

[2] Для того, чтобы судить об этом, предполагается в верхней части нижнего сгустительного сосуда иметь изолированный проводник, который при подъеме ртути до верху даст знать звонком о том, что весь газ выгнан.

[3] Эти сосуды и названы в предшествующем параграфе буквою A.

весами, взятыми для исследования. Поэтому необходимо иметь для разных давлений различные сосуды. Если за предел верного взвешивания счесть $^1/_2$ миллиграмма, то для достижения той степени точности во взвешивании, какую, судя по предыдущему, можно ждать от манометрических определений $\left(\frac{1}{30\,000}\right)$, должно иметь в деле не менее 15 граммов газа, а так как вес литра воздуха при обыкновенной температуре около 1,3 грамма, то для взвешивания воздуха под атмосферным давлением должно взять сосуд емкостью до 12 литров. Впрочем я считаю полезным взять для взвешивания газов под атмосферным давлением сосуд емкостью до 15 литров, так как придется взвешивать и водород, а 15 литров его весят не более 1,35 гр. при 0°, следовательно, тогда надо уже взвешивать с точностью до $\frac{1}{20}$ миллиграмма, чтобы достичь столь же точного результата, как и при воздухе. Однако, произведя взвешивание для водорода при давлении в 5 атмосфер, можно будет довольствоваться и $^1/_4$ миллиграмма, ибо тогда в сосуд взойдет около 6,7 гр. водорода. На этом основан дальнейший расчет. Рассчитывая, что тот же сосуд, в котором будет производиться взвешивание при атмосферном давлении, должен выдержать и перевес целого давления атмосферы (когда будет взвешиваться пустым), полезно дать, судя по предыдущему, его стенкам такую толщину, чтобы сосуд выдержал газ, имеющий давление 5 атмосфер. Для этого можно взять стеклянный сосуд, и его стенкам необходимо тогда придать, судя по наблюденному для стекла пределу упругости, толщину по крайней мере около 4 мм., [1] а стеклянный шар, которого внешний диаметр = = 31,4 сантиметра, а толщина = 0,4 сантиметра, будет весить около 3 килограммов. Так как полной равномерности толщины стеклянные стенки иметь не будут, то его надо сделать тяжелее, да сверх того должно прибавить вес металлического крана и газа (при 5 атмосферах давления 15 литров воздуха весят уже около 100 граммов), а потому должно принять, что взвешиваемый шар будет весить около 5 килограммов. Этим исходным соображением определяется не только наибольшая нагрузка весов, но и устройство сосудов для высоких давлений. Так, например, при давлениях выше 10 атмосфер предполагается взять стальной сосуд. Для того, чтобы в нем вмещалось такое же количество газа, как и в 15 литровом сосуде при давлении 1 атмосферы, он должен иметь объем около $1^1/_2$ литров. Сплошной стальной сосуд можно хорошо выделать, как указали мне на Обуховском заводе, только при эллипсоидальной форме вместилища, особенно если большая ось

[1] Для расчета принять наименьший из наблюденных Шевандье и Вертгеймом предел для разрыва стекла, а именно $A = 100$, для лучшего стекла он = 175 килограммов на кв. сант. По формуле $P = 2A\frac{R^3 - r^3}{R^3 + r^3}$, где P есть давление, при коем достигнется предел упругости или произойдет разрыв; у нас $P = 5$ (атмосфер или 5 килограммов на кв. сантиметр), A принимается = 100, R есть внешний и r внутренний радиус шара. Так как емкость = 15 000 куб. сант., то $r^3 = 3580$, а отсюда находим $R^3 = 3855$, следовательно, $R = 15{,}68$, а $r = 15{,}30$. $R - r = 0{,}38$ сантиметра или около 4 миллиметров.

к малой относится, как 1 : 2; поэтому длина большой оси сосуда должна быть около 25, а малой около 12,5 сантиметров, чтобы вместилось 1500 кубических сантиметров. Теперь должно расчесть, какую толщину должно придать стенкам, чтобы вес их не превышал 4 килограммов (из 5 кило, считая 1 кило на вес газа и крана). Считая удельный вес стали за 7,8, получим, что объем оболочки должен быть около 510 кубических сантиметров, а потому разочтем, что толщина стен сосуда должна быть около 0,65 сантиметра. Приняв ее равною 6 миллиметрам и зная, что в наибольшем поясе радиус равняется 6,25 сантиметра, найдем, что сосуд наш из стали выдержит давление $P = A\,(R - r)\frac{R + r}{R^2 + r^2}$, где A есть предел упругости стали, который для хорошей стали можно допустить = 1500 килограммам на квадратный сантиметр (или 1500 атмосфер), а потому наш сосуд выдержит давление P до 140 атмосфер, ибо приблизительно $R = 6{,}8$, а $r = 6{,}2$. Тогда в сосуд будет вмещаться около 170 граммов воздуха. Для давлений еще бо́льших должно будет иметь сосуд меньшей величины, размер которого определится данными, приведенными выше.

§ 15

Итак по роду исследования необходимы *весы*, на которых можно бы взвешивать до 5 килограммов с точностью до $^1/_2$ миллиграмма, а так как точность весов всегда меньше чувствительности, то требуя верности до $^1/_2$ миллиграмма, надо искать чувствительности до $^1/_4$ или еще лучше до $^1/_{10}$, потому что тогда и при взвешивании легчайшего газа, водорода, погрешность взвешивания не превзойдет погрешности отчитывания объемов. Поэтому задача сводится на устройство весов с нагрузкою в 5 килограммов на каждую сторону и с чувствительностью, по возможности до $^1/_{10}$ миллиграмма. Такая чувствительность $\frac{1}{50\,000\,000}$ едва разве превосходит ту, какой уже достигли лучшие механики,[1] а потому я надеюсь, что при помощи г. Бауера мне удастся достичь желаемого результата, так как при проектировании весов я старался обратить внимание на разные обстоятельства, возвышающие чувствительность, ускоряющие и облегчающие взвешивание и выделку весов. Так как между моими соображениями есть такие, каких я до сих пор нигде не встречал, то и остановлюсь с некоторою подробностью над предположенным мною устройством весов и системою взвешивания.

Удобство взвешивания, чувствительность весов и даже их точность зависят прежде всего от возможности определения малых уклонений коромысла, чего нельзя достичь при помощи стрелки, обыкновенно находящейся при коромысле.

Если стрелка тонка, как то делается обыкновенно, то она гибка, дрожит, имеет самостоятельное колебание и, несмотря на значительные

[1] Напр., на парижской выставке 1867 г. парижский механик Колло выставил подобные весы. О подобных же весах упоминает Миллер в своем исследовании нового английского фунта (Philos. Trans. 1856).

увеличения ее показаний трубою, ею нельзя определить малых углов отклонения. Если стрелка массивна и длинна, а особенно если она снабжена на конце прикрепленною к ней шкалою, на которую можно визировать,[1] то своим значительным моментом, напрасно увеличивает вес коромысла, а следовательно уменьшает чувствительность весов. По этим причинам обыкновенное *устройство стрелки весов должно считать непригодным для достижения высшей чувствительности* в весах. Вследствие этого я считаю более рациональным определение углов (правильнее их тангенсов, которые в действительности и пропорциональны разности грузов) уклонения коромысла при помощи *делений*, нарезанных непосредственно *на один из концов коромысла*,[2] *и* при помощи *микроскопа* с нитями, направленного на них и расположенного на продолжении длины коромысла.[3] Самым же приличным устройством для определения малых уклонений коромысла однако должно считать такое приспособление, которое применяется, по предложению Поггендорфа, при магнитных наблюдениях, а именно *зеркало, прикрепленное* (лучше всего на продолжении оси качания) перпендикулярно *к коромыслу*, удаленную от него *шкалу* и зрительную отчетную (Ablesefernrohr) *трубу*, ибо при их помощи можно определять самые малые углы (двойные тангенсы их), а чрез то не только чувствительность весов возрастает, но и достигается много других удобств).[4] Важнейшим из них я считаю возможность избежать навески малыми грузами, а чрез то достигается ускорение взвешивания, а при нем будет достигнута вернее всего и точность, особенно при определениях такого рода, как представляющиеся мне. Непосредственная нагрузка миллиграммов очень хлопотлива, рейтер, столь удобный для обычных взвешиваний, не годится для точных работ, потому что наложенный на коромысло перемещает его центр тяжести, наблюдение же малых уклонений обычною стрелкою невозможно при большом перевесе, ибо малые доли уклонений тогда не наблюдаются, а при зеркале, шкале и достаточно увеличивающей трубе можно отчитывать и более мелкие части, чем сотые наибольшего уклонения, которое в каждую сторону должно принять в 2—3 градуса. Если так расположить центр тяжести коромысла, чтобы при перевесе груза на 0,1 грамма уклонение было около 5°, то десятые доли миллиграмма найдутся

---

[1] В. С. Глухов в недавнее время снабдил свои весы от лондонской фирмы Ладда и Ертлинга подобным устройством и достиг того, что микроскопом читает $\frac{1}{100}$ миллиграмма. Заменив стрелку плечом коромысла или зеркалом, трубою и шкалою, он, вероятно, определил бы еще меньшие доли.

[2] Уже давно механики, особенно в Америке, устраивают весы с указателем (стрелкой) на конце коромысла; тогда около коромысла помещают шкалу.

[3] Микроскопу лучше придавать это, а не перпендикулярное к коромыслу положение (Траллес и др.), потому что тогда перемещения окажут меньшее влияние, тогда наблюдатель будет сбоку, — а это выгоднее, чем быть спереди, как это объяснено далее, — стрелка *выходит длиннее* и т. д.

[4] Лет 6 или 7 тому назад известный мюнхенский ученый и механик Штейнгель устроил по моей просьбе для Технологического института на этом основании весы с зеркалом, трубкою и шкалою.

тогда, когда можно легко отсчитывать уклонения в 20″ (секунд). При прямом отсчитывании стрелкою это невозможно, а при предполагаемой здесь системе этого легко достичь, тем более, что *угол* уклонения чрез отражение *удваивается* и стрелке можно придать, удаляя шкалу, желаемую длину. Поэтому 0,0001 гр. отвечает в предыдущем расчете 40″, а тангенс 40″, при радиусе, равном 6000 миллиметров (т. е. шкала удалится от весов на 6 метров), равен 1,2 миллиметра, а на расстоянии 6 метров в трубу, увеличивающую раз в 20, уже чрезвычайно легко отсчитать такую величину, а потому *при таком устройстве показаний весов, можно будет* прямо, нагрузив только большие разновески (до сантиграмма или даже до дециграмма) *мелкие доли веса,* особенно *ниже сантиграмма, определять по наблюдению* в трубу *колебаний* коромысла. Если же 0,1 гр. произведет отклонение только на 5°, то центр тяжести можно удалить гораздо более, чем в обыкновенных весах, а чрез то ускорятся колебания, то-есть, весы сделаются устойчивыми без ущерба чувствительности.

Вместо зеркала еще лучше применить, как я уже испытал, призму с полным внутренним отражением, прикрепленную к средине коромысла и обращенную одним катетом к трубе, служащей для наблюдения, а другим — кверху. Тогда на потолке помещения должна быть расположена шкала, деления которой отразятся в призме и будут видимы в трубу. Такое приспособление для наблюдения углов может применяться с пользою и во многих других случаях, потому что представляет возможность, удаляя шкалу, придвинуть трубу к призме,[1] чего нельзя сделать при употреблении зеркала, поставленного перпендикулярно к оси трубы, потому что наблюдатель тогда закроет шкалу,[2] а приближение трубы, при данном удалении шкалы, делает отчет наиболее ясным.

Второе обстоятельство, которое необходимо постоянно иметь в виду, когда производят точные взвешивания, есть *влияние близости наблюдателя* на результат взвешивания. Оно происходит от двух причин. Во-первых, оттого, что наблюдатель, кладя разновес, а особенно многие мелкие разновесы, нагревает одну сторону коромысла весов более, чем другую, а потому относительная длина плеч меняется. Если коромысло латунное, то при перемене температуры одного плеча на $^1/_{100}$ градуса оно сделается длиннее другого почти на 0,0000002, следовательно оттого при нагрузке в 5 килограммов получится разность на 1 миллиграмм.[3] Вторая причина влияния наблюдателя состоит

[1] Употребляя зеркало, обыкновенно шкалу ставят между зеркалом и трубою.

[2] Которая, очевидно, для чувствительности отчета должна быть удалена от зеркала.

[3] Чтобы можно было легко наблюдать такие малые разности температур, правильнее — перемены в относительной температуре плеч от времени первого до времени второго взвешивания, если взвешивание двойное, я предполагал поместить около коромысла чувствительный дифференциальный термометр, кроме термометров, определяющих температуру, что нужно для поправки взвешивания; но теперь думаю достичь еще большей чувствительности, поместив рядом с коромыслом весов другое легкое и чувствительное коромысло и к нему микроскоп. Если произойдет нагревание одной стороны весов, то его можно узнать по уклонению, замечаемому в положении этого добавочного коромысла.

в том, что он изменяет состав (внося влагу и углекислоту выдыхаемого воздуха) и температуру воздуха в шкафу весов, а чрез то делается сомнительною поправка на вес вытесненного воздуха. Предположим, что до приближения наблюдателя влажность воздуха весов была 0,7, температура 20°, давление 760, а после приближения влага = 0,8, а температура 20°,5 и пусть наблюдаемый вес = 2000 гр. и взвешиваемый предмет имеет объем 10,25 литра. Введя поправку по первым данным, считая гири удельного веса 8, получим истинный вес = 2012,8197 гр., а по вторым он будет = 2012,8160. Поэтому погрешность = = 0,0037, да и равновесия полного не настанет, потому что сосуд не нагрелся, воздух около сосуда холоднее окружающего воздуха и т. п. Хотя приемы, употребленные Реньо,[1] не вполне уничтожают все эти неточности, потому что двух шаров действительно равного объема и свойств подобрать нельзя, требуют много времени на одно взвешивание и хотя Реньо не исправил своих данных на вес приложенных гирь,[2] но все-таки приемы Реньо должны лечь в основу всем дальнейшим улучшениям. Близость наблюдателя во все продолжительное время окончания взвешивания так сильно изменяет вес больших предметов, что при таком взвешивании становится необходимым удалиться от весов, а иначе равновесия не наступает, то есть нет правильных колебаний. Разные ширмы не устраняют этого неудобства, как мне давно показал опыт. При вышеописанном способе последнее отсчитывание производится трубою и потому наблюдатель уже неизбежно удаляется от весов. Притом и находясь при весах, он может действовать с короткой стороны их ящика, а не с длинной, и оттого его влияние уменьшается. Для возможно полного устранения влияния наблюдателя на точность взвешивания, я считаю необходимым не только сократить время взвешивания, разделить ящик для весов на ярусы и окружить возможно худшими проводниками тепла,[3] но и пропускать чрез ящик пред концом взвешивания сухой воздух. Верхний шкаф весов должен назначаться только для коромысла и малых гирь, а груз и крупные гири должны ложиться на чашки нижнего ящика, куда имеет доступ наблюдатель только в начале взвешивания. Нижнюю часть шкафа для весов я предполагаю сделать столь массивною (склеить из нескольких деревянных фанерок), чтобы она могла не только служить надежною опорою, но и выдержала бы давление атмосферы, если потребуется произвести взвешивания в безвоздушном пространстве. Верхняя часть шкафа должна быть съемною для того, чтобы можно было ее заменить другим, более массивным ящиком, представляющим колокол воздушного насоса, когда желаем произвести взвешивание

---

[1] Relation I—125, 154.

[2] Достаточно привеска 1 грамма, чтобы поправка на него была (если он из латуни) равна 0,0002 грамма. От этих-то причин, вероятно, отчасти зависит погрешность в весе литра воздуха, доходящая у Реньо (Relation T. 1, стр. 138) до $^1/_{2000}$.

[3] Для чего очень удобны двойные стекла для верхнего ящика и толстые деревянные для нижнего.

в безвоздушном пространстве. Когда все гирьки положены, тогда в предполагаемых весах наблюдатель должен отойти к зрительной трубе,[1] а между тем полезно случайный, содержащийся в весах *воздух заменить комнатным воздухом* определенной влаги и температуры. Вентилятор, доставляющий такой воздух, предполагается устроить в помещении для опытов, потому что при помощи продувания воздуха можно с удобством удерживать в манометре постоянную температуру. Для этой цели воздух, доставляемый вентилятором, будет проникать чрез металлические трубы, положенные в баке с водою, температуру которой можно по произволу регулировать, и потом пройдет в шкаф для манометра. Воздух, назначаемый для весов, предполагается сверх того пропустить чрез волокнистые вещества для удаления случайной пыли. Он взойдет в среднюю часть дна весов, пройдет чрез боковые отверстия (назначенные для прохода чашек) в верхний ящик весов и выйдет чрез особое отверстие, сделанное в крышке весового футляра. Главная цель при этом уровнять воздух весов с окружающим воздухом.

Количество влажности меняется в воздухе, а чрез то при данной температуре и давлении меняется и вес воздуха, а следовательно для точной поправки кажущегося веса на вес вытесненного воздуха необходимо знать не только давление барометра и температуру воздуха, но и степень его влажности, и ее надо, строго говоря, наблюдать в шкафу весов, что весьма неудобно при многочисленных взвешиваниях. Помещение гигроскопических веществ в весовой ящик не устраняет этого неудобства, потому что открывание ящика и приближение к нему наблюдателя приносит к весам новые неопределяемые количества влажности. Когда чрез ящик весов прошло надлежащее количество (опыт укажет какое) комнатного воздуха, тогда должно произвести окончательное взвешивание, определяя трубою тангенс угла отклонения. Такой прием не только даст возможность ввести точную поправку на вес воздуха, но и послужит для того, чтобы с металлических частей весов удалилась осевшая на них случайно влага, и для того, чтобы сделать температуру всех частей весов однообразною. Полагаю, что замеченное мною не раз непостоянство данных при взвешивании больших предметов может быть устранено скорее всего вышеописанным способом.

Для того, чтобы получить несомненно точную поправку на взвешивание в воздухе, я считаю полезным произвести несколько взвешиваний в безвоздушном пространстве. Для этого нижний и верхний ящики весов должно устроить герметически закрывающимися и, положив вычисленное по весу в воздухе количество гирь, выкачать воздух из ящиков весов, заменив сперва верхний стеклянный ящик весов другим, более массивным, о котором упомянуто было выше. Для выкачивания воздуха будет служить та труба (снабженная манометром и краном), чрез которую вдувается сухой воздух. Особенно важно

[1] Впрочем зрительная труба может быть вделана и в футляр весов, потому что от ее расстояния не зависит чувствительность отчета, которая изменяется только от расстояния шкалы и увеличивания трубы.

определение абсолютного веса шара,[1] служащего простейшим средством *для поправки на вес вытесненного воздуха*. Представим себе пустой шар, герметически запаянный, наружный объем которого при t° равен V куб. сант., и пусть его абсолютный вес $= P$ граммов, кажущийся вес его в граммах будет:

$$p = P - e\left(V - \frac{p}{d}\right),$$

где d означает вес одного кубического сантиметра гирь, а e — одного кубического сантиметра воздуха во время взвешивания. Поэтому:

$$e = \frac{P - p}{V - \frac{p}{d}}.$$

Следовательно, если известен абсолютный вес шара, то, взвесивши его в данных условиях, узнаем вес кубического сантиметра воздуха, а потому и можем другие взвешивания в том же воздухе исправить на вес вытесненного воздуха и притом с значительною точностью. Если объем шара будет 10 литров, то-есть 10 000 кубических сантиметров и d $= 8$, то при определении веса с точностью только до 1 миллиграмма вес кубического сантиметра воздуха определится с точностью до 0,00000021 грамма,[2] чего нельзя сделать другими способами, без продолжительной новой работы, особенно если есть необходимость принять во внимание содержание влажности.

Известно, что только двойное взвешивание можно считать точным до предела чувствительности весов, но для него требуется много времени, в течение которого могут совершаться такие перемены в температуре воздуха, которые повлияют на вес большого предмета (например, упомянутого выше шара в 15 литров) в бо́льшей мере, чем мера чувствительности весов. Кроме того, во всяком случае в результате двойного взвешивания должно допустить погрешность вдвое бо́льшую, чем чувствительность весов. Так, если весы чувствительны до 0,0001 гр., то в результате двойного взвешивания можно предполагать погрешность в 0,0002 гр. По этим причинам там, где нельзя применить по продолжительности способ Гаусса, там, для достижения более точного результата, чем тот, какой получается при единичном взвешивании (так как нельзя достичь полного равенства длины плеч и пр.), должно довольствоваться тем способом, упоминаемым давно и употребленным мною при исследовании смесей спирта с водою,[3] который состоит в помещении на одну чашку весов всегда одной тары или гири данного веса, для коего назначаются весы, и в нагрузке другой чашки предме-

[1] Такой шар предложен и употребляется мною с 1859 года. Смотри Comptes rendus 1860. T. L, стр. 54, также «О соединении спирта с водою». 1865, стр. 55.

[2] Такая точность в определении веса кубического сантиметра воздуха совершенно достаточна для поправки веса сосуда емкостью в литр при точности взвешивания до $^2/_{10}$ миллиграмма. Ошибаясь в барометре на $^1/_{10}$ миллиметра, или в температуре на $^1/_{100}$ и не принимая в расчет влаги воздуха, делают гораздо бо́льшую погрешность в определении веса 1 кубического сантиметра воздуха.

[3] «О соединении спирта с водою». 1865, стр. 52. Мне известно одно указание на этот способ взвешивания, а именно в каталоге физических приборов парижского механика Саллерона.

том и гирями, дополняющими вес до предельного. Такую *систему взвешивания* я предполагаю употребить и при предстоящем исследовании, так как она представляет следующие удобства и преимущества. 1) Нагрузка весов, а следовательно прогиб коромысла, угол отклонения на данный груз и чувствительность тогда остаются при всех взвешиваниях одни и те же, а потому 2) можно уничтожить тот регулятор центра тяжести, каким снабжаются обыкновенно точные весы, и придать им раз навсегда желаемую чувствительность и желаемое положение центра тяжести и 3) раз установив соответствие между тангенсами углов отклонения и разностями веса на обеих чашках, можно всегда руководствоваться одними и теми же числами для суждения о весе по углу отклонения коромысла. 4) Если на одну чашку положить, например, в наших весах, 5 выверенных килограммов, а на другую уравновешивающий груз (тару), который постоянно на эту чашку и будет помещаться, то, положив вновь на первую чашку 5 килограммов, легко каждый раз удостовериться в том, что весы не претерпели изменения, например, в том, что температура обоих плеч коромысла одинакова, *а потому взвешивание будет иметь все достоинства двойного взвешивания, хотя будет единичное.* 5) Чрез это время взвешивания сокращается по сравнению с двойным взвешиванием, и точность такого взвешивания будет больше, чем по способу Борда.[1] 6) При таком способе взвешивания все дело взвешивания ограничивается работою на одной стороне весов, а это не только облегчает работу взвешивания, но и уменьшает вредное влияние близости наблюдателя, потому что позволяет ему поместиться не спереди, а сбоку весов, и 7) при таком способе взвешивания достигаются технические выгоды в устройстве коромысла, потому что неравенство плеч, косина призм и пр. здесь оказывают наименее влияния.

Для практической стороны дела при взвешивании и устройстве весов весьма важно обратить должное внимание на арретировку, потому что при всех прочих достоинствах весы станут скоро негодными или по крайней мере худшими, чем были прежде, при арретировке, сдвигающей коромысло или не утверждающей на месте подвесок, потому что тогда призмы тупятся. При том тогда качания получаются неправильными и значительными, что замедляет взвешивание. Лучшая из форм арретирования, ведущая свое начало от Гиргенсона, употребляется ныне Ертлингом и мн. др., и состоит в том, что устраивается параллельно весовому коромыслу (одно простое или связанное из двух) арретировочное коромысло, движущееся вверх и вниз. На нем имеются впадины или острия, отвечающие остриям или впадинам на коромысле весов, и на подвесках для чашек. Это устройство однако все-таки оставляет желать лучшего по следующей причине. Арретир встречает или оставляет коромысло почти всегда при наклонном его положении, а тогда по горизонтальной линии расстояние впадин коромысла и подвесок не равняется расстоянию соответствующих остриев арретира,

[1] Способ Гаусса есть точнейший и его должно применять, где возможно, а особенно при проверке гирь.

если это равенство существует при покойном горизонтальном положении коромысла. Назовем чрез N расстояние крайних впадин арретира, отвечающих такому же N расстоянию остриев на краях коромысла или на подвесках. Очевидно, что при уклонении коромысла на угол α (считая от положения закрепления) расстояние крайних точек коромысла по горизонтальной линии будет $= N \cos \alpha$, то-есть будет меньше N. Если уклонение $= 5°$, и расстояние $N = 350$ мм.,[1] то теперь оно будет $= 348{,}67$ миллиметра, а расстояние соответственной подхватывающей части арретира по горизонтальной линии останется прежнее, 350 мм. Одно острие наклоненного бока коромысла будет отстоять от средины на 174,33 мм., а оно попадет в углубление арретира, отстоящее на 175 мм. От этого произойдет одно из двух: или коромысло (и подвески) скользнет по направлению от средины, и тогда ножи тупятся, плоскости царапаются, или же коромысло (и подвески) останется на месте, но тогда арретирование не достигает своей цели; [2] при опускании такая арретировка наверное должна перемещать коромысло, как бы совершенно она ни была выполнена. Думаю, что в этом соображении, которого я нигде не встретил до сих пор, находит объяснение тот факт, что при самом осторожном обращении с весами они все-таки чрез некоторое время ухудшаются, и их новое улучшение наступает при новом натачивании призм. Соображение это подало мне мысль устроить новую форму арретирования, долженствующую устранить указанный недостаток. Очевидно, что и арретиру должно придать такое же переменное горизонтальное расстояние крайних точек, какое существует у весового коромысла, изменяющееся сообразно наклону, при коем встречаются соответственные точки коромысла и арретира. Для этого арретиру должно придать форму шарнира, горизонтальная ось вращения которого должна совпадать с горизонтальной осью вращения коромысла. Тогда, где бы один из шарниров арретира ни встретил коромысло или где бы он его ни оставил, во всяком случае при опускании и подъеме не произойдет перемещения оси коромысла по горизонтальной плоскости, а будет только подъем. Необходимо однако соблюсти, чтобы точки встречи коромысла и арретира в состоянии покоя были в одной горизонтальной плоскости с осью качания, если желаем достичь наилучшего результата. Этот вид арретирования и проектирован ныне мною для весов, которые делаются в мастерской г. Брауэра. Не излишне заметить, что предлагаемый мною способ арретирования допускает только остановку, закрепу коромысла и подвесок, а не поднятие их от опор, как видим то во многих еще весах; и это очень важно для прочности весов, потому что всякое опускание неизбежно сопряжено с ударом, хотя бы и слабым, но могущим тупить призмы.

---

[1] Обыкновеннейший случай малых весов, при большем коромысле разность будет конечно большая.

[2] Потому что тогда арретирование не придает коромыслу и чашкам совершенно определенного положения.

§ 16

Теперь мне остается описать устройство коромысла, потому что прочие подробности моего проекта весов или не столь существенны, или же не могут быть ясно описаны без рисунка.

Первый вопрос, рождающийся относительно коромысла весов, назначаемых для данных чувствительности и нагрузки, есть *вопрос о длине плеч*, ибо ею определяется уже отчасти и вес коромысла. Знаменитый математик Ейлер в своем исследовании (относящемся к 1738 г.) о весах [1] дал те начала, которых держатся с тех пор все механики и которые излагаются во всех курсах физики. Одно из правил (Regula III, стр. 10 и 18), данное им, состоит в следующем: «Коромысло весов для их чувствительности должно быть по возможности длинно». Оно легко выводится из известной формулы

$$\operatorname{tg}\alpha = p\,\frac{1}{m}\,\frac{l}{P}\,;$$ [2]

относящейся к равноплечему коромыслу, у коего точка опоры и точки привеса чашек лежат на одной прямой линии. Но следствие, выведенное Ейлером и применяемое практиками, справедливо только для математического, негибкого коромысла, для коего можно вообразить вес P независимым от l, а не для физического, потому что вес коромысла при данном грузе зависит от его длины l, то-есть P и l суть зависимые переменные от наибольшего Q груза, для коего назначены весы. От него притом происходит прогиб, меняющий положение центра тяжести m, а следовательно и m стоит в зависимости от l, P и Q, а при выводе допускаются l и m независимыми, чего нет в физическом коромысле. Полная теория физических весов могла бы содействовать улучшению устройства этого важного прибора, но здесь достаточно ограничиться некоторыми элементарными соображениями, дабы доказать, что *чувствительность истинных весов стоит вовсе не в такой зависимости от длины коромысла, какая общепринята*.

Чувствительность весов есть частное из веса Q чашки с наибольшим разновесом на наименьший груз p, какой еще может наблюдаться весами. В нашем примере чувствительность определится из того, что $p = 0{,}0001$, а $Q = 5000$ граммов и она $= 50\,000\,000$. Частное $\frac{Q}{p}$ или, при данном Q, дробь $\frac{1}{p}$ должно сделать наименьшими, чтобы получить выгоднейшее устройство весов.[3] По приведенному определению чув-

[1] Commentarii Academiae scienciarum I. Petropolitanae T. X. Ann. 1738 p. 3. «Disquisitio de bilancibus. Auctore Eulero».

[2] α — угол уклонения коромысла, когда на одной чашке есть перевес p. Вес коромысла P, длина плеча l, а m — расстояние центра тяжести коромысла от точки его опоры.

[3] Нередко рассматривают абсолютную чувствительность, то есть определяют тот наименьший груз, положение которого заметно еще на весах, не обращая внимания на вес всей нагрузки. Хотя это рассмотрение имеет свой интерес, но оно одностороннее, чем то, какое принято в этой статье, ибо определяет один minimum на-

ствительность аналитических весов, где весят не более 50 гр., и определяют 0,0005 гр., есть 100 000 (сто тысяч). Из вышеприведенной формулы Ейлера очевидно, что

$$p_1 = \operatorname{tg} \alpha_1 m \frac{P}{l}$$

где α_1 есть наименьший наблюдаемый угол уклонения коромысла и p_1 есть наименьший из определяемых грузов. Ясно поэтому, что чувствительность будет тем бо́льшая (то-есть p_1 тем меньше), чем 1) меньший угол α_1 можно будет наблюдать в весах; и это справедливо во всех случаях, потому что α_1 не зависит от m, P и l, а только от способа, каким наблюдаются уклонения коромысла. Стрелка есть худшее из средств, а наилучшее есть зеркало, труба и шкала, потому что, увеличивая силу трубы и удаляя шкалу от зеркала, можно определять все более и более малые величины α_1; 2) Чувствительность тем больше, чем m меньше, но эту величину известными способами механик может довести до всякого желаемого minimum'а, ибо легко даже совместить центр тяжести с точкою опоры или сделать $m = 0$, даже сделать его отрицательным, а потому здесь об этом не должно быть и речи. При той системе взвешивания, какую я думаю применить, нагрузка всегда одна и та же, а потому, если назовем чрез M наибольший прогиб коромысла, какой можно допустить в весах (без нарушения их прочности), то, по учению об упругости, это

$$M = \frac{2Q(2l)^3}{ah^3 4E} = \frac{4Ql^3}{ah^3E} \qquad \text{II}$$

если счесть коромысло призматическим, при длине $2l$, высоте h и толщине a и где E есть коэффициент упругости материала, из коего сделано коромысло. Если коромысло представляет, как это и должно быть, балку, приближающуюся к форме тела равного сопротивления изгибу, то вышеописанное значение M изменится до некоторой степени, но для простоты изложения мы допустим призматическую форму, ибо вывод в сущности будет тот же. Из уравнения II следует, что

$$l = h \sqrt[3]{\frac{MEa}{4Q}}, \qquad \text{III}$$

где M есть условная, но постоянная величина и если она дана на основании свойств взятого материала или на основании тех соображений, которые вытекают из допущения при изгибе возможных перемещений центра тяжести, то по ней можно определить и длину коромысла. 3) Чувствительность наконец тем больше (значение p_1 тем меньше), чем меньше частное $\frac{P}{l}$. Если возьмем призматическое коромысло

вески, а не зависит от ее maximum'а. Для аналитическо-химической практики, где навески всегда почти малы, важна почти одна абсолютная чувствительность, а для физических исследований одинаково важно знать наибольшую и наименьшую чувствительность и их отношение, ибо ими определяется достоинство результатов, каких можно достичь весами.

и означим чрез δ плотность материала, то очевидно, что $P = \delta\, 2lha$, а потому

$$\frac{P}{l} = 2\delta h a.$$

Наименьшее значение этой дроби, а следовательно и *чувствительность негибких весов*, судя простейшим образом по I, очевидно *не зависит от длины коромысла*.[1] Если же допустить гибкость, то в $\frac{P}{l}$ надо поставить значение l по III, тогда

$$\frac{P}{l} = \frac{2\delta lha}{h\sqrt{\frac{MEa}{4Q}}} = 2\delta l\sqrt[3]{\frac{4a^2Q}{ME}}. \qquad \text{IV}$$

Следовательно, наименьшее значение $\frac{P}{l}$ достигается при малом δ, при малой длине l, при малой толщине a, при меньшем грузе Q и при бо́льшем значении допускаемого прогиба M и коэффициента E упругости материала. Подставляя IV в I получим:[2]

$$p_1 = \operatorname{tg}\alpha_1 \cdot m\, 2\delta l\sqrt[3]{\frac{4a^2Q}{ME}} \qquad \text{V}$$

а потому

$$\frac{Q}{p_1} = \frac{1}{\operatorname{tg}\alpha_1 \cdot m\, 2l\delta}\sqrt[3]{\frac{MEQ^2}{4a^2}} \qquad \text{VI}$$

Значит, при прочих равных условиях, чувствительность весов $\frac{Q}{p}$ возрастает с нагрузкою Q, хотя p_1 и будет тем меньше, чем меньше Q. Действительно, ныне легко уже изготовляются весы, которые при нагрузке в 10 кг. чувствуют сантиграмм, при нагрузке в 1 килограмм — миллиграмм и т. д. $\left(\frac{Q}{p} = 1\,000\,000\right)$, но не умеют делать с такой же легкостью весов, которые при малом грузе чувствовали бы $\frac{1}{10\,000\,000}$ нагрузки, хотя некоторые художники и достигают этого. Из уравнения V, определяющего условия абсолютной чувствительности гибких физических весов, не принимая во внимание трения, ясно, что *весы будут чувствовать тем меньшую нагрузку*, при прочих (α_1 и m) равных условиях, *чем легче материал коромысла, чем короче и тоньше коромысло, чем больше коэффициент упругости материала, из которого приготовлено коромысло* и чем больший прогиб M можно допу-

[1] Если коромысло ромбоидально, имеет толщину a, высоту по концам тоже a и в середине na, то частное $\frac{P}{l} = \delta a^2(n+1)$; подобный же вывод получится и при других формах, близких к формам балки равного сопротивления.

[2] Строго говоря, допуская изгиб, мы уже не должны применять формулу I, ибо она относится к тому случаю, когда три острия коромысла лежат в одной плоскости, но можно так устроить коромысло, чтобы при прогибе от постоянного груза (§ 12) острия были на одной прямой линии. Напомню, что я не имею в виду дать здесь полную теорию физических весов, для коей необходимо принять во внимание трение и целый ряд других обстоятельств.

стить в них по условиям взвешивания. Часть этих условий (малые m и δ, большое E — оттого коромысло сильно куют — это увеличивает коэффициент упругости) применяется давно на деле, часть условий едва достижима (так величину a нельзя сделать очень малою, коромысло будет гнуться в сторону, не будет устойчиво), а часть (малость длины и значительность допускаемого прогиба), сколько мне известно,[1] не обращала еще на себя внимания ни теоретиков, ни практиков, как ус овие чувствительно ти есов.

§ 17

Таким образом длина коромысла весов не определяется ни их нагрузкою, ни их чувствительностью (а совокупностью многих условий), а потому для простейшего определения ее необходимо избрать другие данные. Для этого может служить: во-первых, определение размеров наибольших предметов, которые помещаются на обе (для симметрии, которая необходима для равенства потерь в воздухе и для возможности применения способа Гаусса) чашки весов. Так как наибольшие шары (в 15 литров), какие мне придется взвешивать, имеют в диаметре около 32 сантиметров, то, оставив свободное место для качания их, я принял длину коромысла равною 40 сантиметрам, то-есть для каждого плеча 20 сантиметров. Другое соображение, могущее помимо размера взвешиваемых предметов определить длину коромысла, состоит в следующем: боковым призмам, из чего бы они ни были сделаны, должно придать некоторые размеры (к сожалению учение о сопротивлении материалов не дает способов вычислить эти размеры), а следовательно и некоторый вес, затем в коромысле должны быть части, закрепляющие эти боковые призмы и, зная вес этих неизбежных частей, можно уже вычислить, какую *наивыгоднейшую* длину должно придать коромыслу

[1] Гамбургский механик г. Бунге (Paul Bunge) обратил уже внимание на короткость коромысла, но повод, который он выставляет для того, не верен и его система весов едва ли хороша. Как повод для устройства короткого коромысла г. Бунге выставляет то, что тогда весы качаются быстрее, но зато можно доказать, что тогда чувствительность уменьшится. Дело в том, что если груз велик, сравнительно с весом коромысла (например, в проектированных мною весах вес коромысла 400 гр., а всего груза с чашками около 11 000 гр.), то время одного колебания весьма близко выразится формулою:

$$t = N\frac{1}{\sqrt{Pm}},$$

где N есть постоянная величина, а прочие буквы те же, что и в прежних формулах; следовательно, времена колебания весов возрастают с длиною коромысла, так же быстро, как углы отклонения коромысла, а потому чем чувствительнее весы, тем времена их колебания длиннее и сокращать время колебания, уменьшая длину, можно только за счет чувствительности, если не принять во внимание других условий. Опыт утверждает справедливость этого вывода. Что же касается достоинства системы весов г. Бунге, то о ней можно судить уже по огромному числу винтов, имеющихся на его коромысле и по тому еще, что стальное коромысло имеет столь значительную высоту, что оно будет неизбежно неустойчиво, то-есть будет легко изгибаться в сторону. Практика больших механических изделий давно показала, что высота балки не должна превосходить более чем в 10 раз ее ширину.

для того, чтобы вышло наименьшее значение дроби $\frac{P}{l}$. Судя по тому, что я предполагаю придать боковым призмам и их закрепам вес около 7 гр., В. Л. Кирпичев вычислил и, вероятно, публикует свой способ расчета, что наивыгоднейшая длина плеча коромысла весов, нагрузки коих с каждой стороны = 6 килограммам (груз с чашкою и запасным весом) должна быть приблизительно = 12 сантиметрам, если, как предположено мною, сделать коромысло из алюминиевой бронзы. Но при этом он нашел также, что, изменяя эту длину в 20 сантиметров, как того требует вышеуказанное условие, мы только очень незначительно увеличим значение частного $\frac{P}{l}$. Мыслим еще третий способ определения длины коромысла, но для его применения нет ныне достаточных теоретических и практических данных: острия призм, какой бы твердости они ни были, при нагрузке сдавливаются, так сказать, тупеют, хотя это изменение формы и принадлежит к числу упругих. Подобное же изменение (вдавливание) совершается и в пластинке, на которой покоятся острия. Если бы была известна мера изменения формы острия, то по ней и по требуемой чувствительности можно было бы определить длину коромысла. За недостатком сведений этого рода должно ограничиться для уменьшения этого влияния выбором наиболее твердого материала для призм и их подкладок. Давно уже делают весы с агатовыми призмами; ныне такие изготовляет известная лондонская фирма Эртлинга, а заменяя агат топазом, я думаю, можно достичь еще лучших результатов. Действительно *топаз* обладает ясным листопрохождением (параллельным конечной плоскости), и потому призма, вышлифованная так, чтобы листопрохождения шли параллельно острому ребру и были вертикальны, а пластинки, вышлифованные по плоскостям листопрохождения, будут удовлетворять в высшей мере желаемому условию твердости, тем больше, что топаз и сам по себе гораздо тверже кварца. При том топаз из всех твердейших кристаллических минералов встречается чаще в больших однородных кристаллах, и один из таких уральских образцов дан мне по обязательности профессора нашего университета М. В. Ерофеева.

Найдя таким образом длину коромысла и задавшись размерами боковых (длина ребра 1 сантиметр) и средней (2 сантиметра) призм и мест для их закрепления, я вычертил форму коромысла на основании следующих соображений: 1) нужно было соединить три призмы в одну целую балку, представляющую по возможности фигуру балки равного сопротивления изгибу; 2) отношение всей полной высоты балки в ее средине к ее толщине я допустил как 10 к 1; 3) при нагрузке в 6 кило на каждую боковую призму я допустил прогиб не более как в $^1/_{10}$ миллиметра, что изменяет расстояние центра тяжести только на весьма малую долю; 4) коромысло я предполагал сделанным из алюминиевой бронзы, коэффициент упругости которой (по Филиппсу = = 13 000 килограммов на квадратный миллиметр) не многим меньше, чем для стали (от 17 000 до 21 000), и больше, чем латуни (9000), серебра (7000) и др. известных сплавов. Алюминиевая бронза предста-

вляет все преимущества для выделки коромысла и если ее можно заменить каким-либо другим трудно окисляемым [1] металлом, то разве никкелем (E = 23 000 по Филиппсу) или алюминием (коэффициент упругости 8000 по Филиппсу — но зато он легок); но эти металлы не могут быть считаемы столь однородными; 5) вычертив размеры и фигуру *сплошного* коромысла, я придал ему такое придаточное *скрепление снизу*, какое потребовалось для того, чтобы при той же толщине коромысла поместить его центр тяжести близ острия средней призмы.

По этим расчетам вышло коромысло весом в 400 граммов. В. Л. Кирпичев, по моей просьбе, также вычертил коромысло алюминиевой бронзы, руководствуясь тем, чтобы натяжение во всех сечениях вырезного коромысла было по возможности одно и то же, а именно не более 75 килограммов на квадратный сантиметр, причем, должно заметить, было принято, что алюминиевая бронза выдерживает до предела упругости натяжение до 1400 кило на квадратный сантиметр. Полученные им размеры столь близко сошлись с найденными мною (вес вышел опять около 400 граммов), что на найденной форме коромысла я и решился остановиться.

Приводя здесь соображения, касающиеся до устройства коромысла, я имею в виду указать, что вопрос об устройстве весов заслуживает более тщательной разработки и что ныне употребляемые модели весов иногда страдают отсутствием рациональности, которую должно требовать от такого важного мерительного прибора, каковы весы. Как пример нерациональности в устройстве многих весов можно указать то, что в большинстве их на коромысле находится много винтов. У меня в распоряжении находятся весы известнейших мастеров, в которых можно насчитать более 20 (стальных, но Ладд и Эртлинг делают уже все винты латунными — это лучше) винтов для закрепления призм, для укрепления гаек и т. п. Это вредит коромыслу, потому что винтовое закрепление не только непрочно, но и подвергается временным изменениям при перемене температур, а в результате ведет к объяснению некоторых всем известных, иногда ничем не объяснимых быстрых изменений в весах, которые притом иногда со временем уменьшаются или исчезают. Притом, если винты допускают регулирование положения призм, то зато придают им и некоторую шаткость. Этот недостаток я предполагаю устранить, уничтожив закрепление призм на коромысле винтами, а закрепляя призмы вдавливанием в нагретое подходящее отверстие коромысла. Закрепление средней призмы вдавливанием уже давно введено, но тот же способ едва ли не выгоднее всякого другого и для крепления боковых призм. При этом конечно уже должно отказаться от возможности достичь полного равенства плеч, но оно и не нужно при способе двойного взвешивания, да и при винтах не достигается ни в совершенстве, ни с постоянством.

---

[1] Впрочем окисление с поверхности маловажно. Сталь была бы наилучшим материалом для коромысла, если бы можно было избежать намагничивания и случайного приближения железных предметов.

Переходя к краткому указанию других предполагаемых мною приемов для исследования, считаю не излишним перечислить начала, которым должны, по моему мнению, удовлетворять всякие весы, назначаемые для точных работ: 1) материал коромысла должен обладать однородностью, малою изменяемостью, легкостью и значительным коэффициентом упругости; сумма этих свойств хорошо соединяется в литой алюминиевой бронзе. 2) Коромысло должно быть по возможности коротко, высота его должна быть по возможности велика по отношению к толщине; 3) в нем должно избежать винтового закрепления призм. 4) Призмы и подставки к ним должно делать из наитвердейшего материала, а для этого приличнее всего брать горный хрусталь и топаз. 5) Размеры коромысла для данной нагрузки должно расчесть по известным принципам устройства балок. 6) Боковые призмы должны быть в два раза короче средней, ибо подвергаются вдвое меньшему давлению. 7) Простейшею системою быстрого и точного взвешивания должно считать (там, где нельзя применить способ перекладывания Гаусса) нагрузку постоянную и определение веса чрез разность, так как при нем облегчается механику устройство весов, упрощается самое взвешивание и так как этот способ, не имея недостатков способа Борда, имеет все его достоинства. 8) Коромысло и воздух в ящике весов должно, по возможности, предохранить от влияния близости наблюдателя, а для этого полезно весы строить в два яруса и в нижнем помещать чашки для предмета и крупных гирь. Для убеждения в относительном постоянстве температур обоих плеч необходимо иметь при весах или дифференцированный термометр, или особое свободное коромысло. 9) Употребление рейтера, как предмета изменяющего положение центра тяжести коромысла, должно избегать, а для определения малых навесок определять угол отклонения коромысла. 10) Для чувствительности весов столь же важно, как уменьшение расстояния центра тяжести, так и такое устройство, которое допускает определение малых углов отклонения. 11) Для этой последней цели стрелка с выгодою может быть заменена отражающей призмою, шкалою и трубою, так как чрез отражение угол отклонения удваивается и оптическая стрелка может быть сделана длинною, без ущерба чувствительности, ибо не имеет веса. 12) Стрелка весов во всяком случае с пользою заменяется самым коромыслом. 13) От правильного действия арретировки зависит не только сохранение весов, но и точность или согласие взвешиваний. 14) Острия коромысла не должно при арретировке удалять от подставок, потому что иначе получаются вредящие призмам удары. Коромысло должно арретированием только останавливать.[1] 15) Для поправки на взвешивание в воздухе выгодно продувать в ящик весов сухой воздух пред окончательным определением веса. 16) Простейшее и весьма точное средство для определения веса воздуха, что нужно для поправки найденного веса, дает герметический шар, кото-

[1] Этот принцип, сколько мне известно, ввел в практику г. Саллерон в Париже.

рого объем и вес заранее известны. К этим условиям устройства [1] весов и взвешивания должно прибавить и другие общеизвестные правила, и я был бы счастлив, если бы мои замечания о весах возбудили появление точного, сопровождаемого математическим анализом и опытами,[2] подробного исследования о весах, устройство которых немного изменилось с конца прошлого столетия по сих пор, я думаю, потому именно, что после Эйлера никто не занимался теориею этого важного прибора. Приложив к весам запас современных знаний, можно значительно увеличить их чувствительность и постоянство.

§ 18

Для определения плотностей газов необходимо кроме веса знать *объем*, а сверх всех известных поправок на объем в предстоящих исследованиях должно ввести точную поправку на изменение объема сосудов от разницы внутреннего и внешнего давлений. А что такое определение, даже при малом перевесе давления, необходимо, особенно для больших стеклянных шаров, так в этом я убедился многократно: если сосуд калибровать ртутью, то он дает бóльший объем, чем при определении его объема водою, и в доказательство того, что это зависит от бóльшего давления ртути, чем воды, я неоднократно делал определение ртутью, погрузив сосуд в ванну из ртути же; тогда выходили числа те же, что и при воде, и если шар, наполненный ртутью, вынуть из ртутной ванны, то тотчас происходит падение уровня.[3] В тех исследованиях, где это обстоятельство не принято во внимание, есть устранимая погрешность в определении объемов. В предстоящих исследованиях поправку на изменение объема от давления должно определить с точностью, хотя и будут взяты сосуды толстостенные, так как и давления будут велики. Должно будет при том так направить исследования, чтобы избежать пластических (остающихся) изменений объема сосудов, чтобы иметь дело только с упругими изменениями. Для этого сосуд, назначаемый для определений до известных давлений, надо подвергнуть давлению, бóльшему, чем это предельное давление,

---

[1] Считаю неизлишним прибавить здесь одну, повидимому, мелкую, но существенную техническую подробность устройства проектированных мною весов, которую желал бы видеть распространенною. В большинстве известных мне весов арретировка устроена так, что может при случайных потрясениях сама собою падать, а чрез то весы портятся. Чтобы избежать этого, я проектировал при ручке арретира такой зубчатый храповик, который при снятии ручки (а ручка арретира обыкновенно съемная) и даже при отсутствии давления на ее ручку закрепляет арретир так, что самопроизвольное его движение невозможно. Устройство такого храповика не затруднит ни одного механика, а между тем придаст весам надежность.

[2] Особенно интересно было бы изучить влияние так называемого трения, которое можно найти, определив m, P и l и наблюдая при данном p углы отклонения. Весьма важно узнать, как изменяется это трение с нагрузкою, материалом призм и т. п. Определение времен колебания окажется вероятно при этом полезным для изучения весов.

[3] Общеизвестная разность в показаниях стоящего и лежащего термометра зависит от той же причины, то есть от расширения резервуара под давлением столба ртути.

потому что тогда меньшие давления произведут, как показывают опыты над упругостью разных материалов, только одни упругие изменения формы. А чтобы определить эти последние, должно будет снабдить исследуемый сосуд калиброванною капиллярною трубкою, наполнить ртутью или водою и определять расширение сосуда от увеличенного внутри давления, что и можно будет сделать, измеряя положение жидкости в капиллярной трубке, принимая, конечно, все предосторожности для сохранения температуры. Зная сжимаемость жидкости, можно уже будет по результатам опыта определить и расширяемость сосуда. А для того, чтобы определить сжимаемость ртути и воды, я предполагаю произвести ряд исследований, которые соединю с определением сжимаемости газов. Эти исследования необходимы особенно потому, что существующие до сих пор определения или ограничиваются малыми давлениями,[1] или значительно между собою разноречат [2] и еще потому, что, несмотря на обширность литературы о сжимаемости жидкостей, все еще нельзя считать решенным вопрос об изменении формы сосуда, на который производится давление со всех сторон, а от решения этого вопроса в ту или другую сторону [3] зависит и определение величины сжатия жидкостей. Для решения же этого вопроса я предполагаю сделать исследование над сплошными и полыми внутри каучуковыми шарами и сосудами.

Кроме изменения от давления, объем газов, емкость сосудов и проч. изменяются с температурою, и это влияние весьма усложняет решение вопроса о сжимаемости от давления, а потому на первое время, я ограничусь определениями плотностей газов *при некоторой постоянной температуре*, близкой к обыкновенной, предполагая современем перейти к отдельному определению температурных изменений. Здесь уместно упомянуть, что при настоящем запасе данных нельзя считать достаточно точными ни определения Реньо [4] коэффициента расширения ртути, ни определения [5] расширения воды, потому что предел точности тех и других не велик. Так у Розетти встречаются в разных рядах наблюдений плотности воды различия в 0,00003, а такие разности в плотности влекут за собой при пользовании ими значительные разности в результатах. Вопрос этот [6] имеет особое значение при определении объемов сосудов и их коэффициента расширения, а в комбинации с известным несоответствием между килограммом и весом куби-

---

[1] Таковы наблюдения Реньо, Грасси, Жамена и др. Один Кайльте, да и то в последнее время (Comptes rendus 1872, LXXV—72), делал определения для воды, спирта и др. при давлениях, доходящих до 700 атмосфер; но он не ввел поправки на сжимаемость сосуда, а потому его числа должны быть поправлены.

[2] Так, для сжимаемости ртути под давлением атмосферы Реньо дает коэффициент 0,000003517, для воды 0,00004756, Амори и Декан (Comptes rendus LXVIII—1564) для ртути 0,00000187, для воды 0,0000457.

[3] См., напр., Regnault, Relation I—429 и след.

[4] Об этом предмете смотри чрезвычайно интересную статью голландского ученого H. Bosscha в Poggendorff's Annalen, Ergänzungsb. V—258.

[5] «О соединении спирта с водою», стр. 40. Новые данные принадлежат Матиссену, Вейднеру, Розетти (Pogg. Annalen Ergänzungsb. V—258) и др.

[6] Ему посвящен конец 2-й главы этого сочинения.

ческого дециметра воды [1] делает всякие абсолютные определения объемов и температур очень шаткими. Все вопросы об объемах, температурах и коэффициентах расширения, тесно связанные между собою, могут быть решены только новыми, более прямыми и точными, чем существующие, определениями коэффициентов расширения и относительных весов воды, ртути и воздуха. При точных способах определения температур, лучшим способом для тщательного решения вопроса об относительном расширении ртути и воды я считаю способ весовой. Не вдаюсь теперь в описание своих предположений этого рода, потому, что думаю приступить к осуществлению их только после того, как кончу исследование об изменении плотностей газов с давлением.

§ 19

Мне остается сказать еще о точных единицах *мер*, которые стану употреблять, и об определении влияния поверхности сосуда на плотность газа. Что касается первого вопроса, то я предполагаю избрать один килограмм за норму, с ним сличить все свои разновесы и определить его отношение к нормальному килограмму, по оригиналу или по известным копиям его. Что же касается до меры длины, то за норму я приму *метр*, который изготовлен для меня г. Брауэром. При устройстве его я держался того же способа, который не раз был уже выше указан и который состоит в употреблении трубчатых мерительных шкал. Метр мой сделан из тянутой (а не паянной) трубки из красной меди и его всегда можно, не вынимая из оправы, довести до условной температуры, при которой отношение его к истинному прототипному парижскому метру должно быть определено особым сличением. Предполагаемая мною система трубчатых мер представляет в этом отношении удобства, каких не имеют общераспространенные сплошные меры.[2]

---

[1] См. Kupfer. Travaux de la commission pour fixer les mesures et les poids de l'Empire de Russie. T. II—415 и др.

[2] Вопрос о нормальных мерах и весах, ныне вновь поднятый, по справедливости заслуживает внимания, и я думаю, что платина, употребленная во Франции для таких мер, мало прилична для этой цели, потому что в чистоте, однородности и постоянстве ее (она гигроскопична, поглощает газы, мягка) ныне нет уверенности, а воспроизведение из нее копий дорого. Что касается до копий метра, то мне кажется наиболее удобным делать их из трубок стекла или какого-нибудь однородного металла, при том чистого (а не из сплава) и дешевого, а такова и есть медь (но едва ли, повидимому, сталь), а потому она и избрана мною для нормального метра. Если бы такое мнение распространилось, то при ожидаемой установке нового нормального метра было бы легко изготовить желаемое количество совершенно одинаковых мер. Трубчатую систему предполагаю также употреблять и для компараторов, и такая система может быть даже применена к винту делительных машин. Считаю необходимым сверх того упомянуть здесь о том, что *нормальные металлические меры можно сделать так, чтобы их длина при всех температурах оставалась постоянною*. Для этого их должно сделать из двух металлов, имеющих разные коэффициенты расширения, подобно уравнительному маятнику. Нижняя длинная линейка должна иметь малый коэффициент k, длину ее назовем L. На концах этой линейки должно положить две короткие линейки длиною l с большим коэффициентом расширения K. Наружные концы их должны быть скреплены с концами нижней линейки, а на ближних концах верхних линеек нанесутся черты, означающие не-

Что касается до способа определения *влияния поверхности сосудов на плотность газов*, то я думаю определить существование этого влияния и отчасти его меру, находя плотность газа при данном давлении и при изменяемом отношении между емкостью сосуда и поглощающею поверхностью. Пусть r есть радиус шара, емкость его $\frac{4}{3}\pi r^3$, а поверхность $4\pi r^2$, отношение их $= \frac{3}{r}$ и пусть вес вмещающегося газа при давлении h и при $t°$ будет таков, что плотность газа равна d; возьмем другой бóльший шар, с радиусом R, в нем также определим плотность при тех же условиях температуры и давления. Пусть она будет d_1. Если $d_1 = d$, в пределе погрешности наблюдения, тогда сгущение на поверхности, если оно есть, не имеет заметного влияния на результат. Если же не так, если на стенках происходит измеримое уплотнение, то d_1 будет меньше d, потому что в первом шаре на одну меру емкости (например, на куб. сант.) приходится $\frac{3}{r}$ единиц поверхности (например, квадратных сантиметров), а во втором $\frac{3}{R}$; а так как r меньше R, то, значит, сгущение окажет в первом случае бóльшее влияние, чем во втором. Тогда необходимо будет определить меру уплотнения данного газа на одну единицу поверхности. Для этого можно, при тех же условиях температуры и давления, определить плотность в трубчатом сосуде, в котором отношение поверхности к объему будет еще больше, а следовательно плотность выйдет еще бóльшая. Собрав такие данные (вводя в трубчатый сосуд нити или палочки, можно еще больше уменьшить объем и увеличить поверхность, как делал Магнус) можно будет определить и меру уплотнения на поверхности, а потому поправленный результат будет освобожден от этой погрешности, если она существует в заметной мере для несгущаемых газов, как доказали ее, например, для сернистого газа.

измененную длину D. Очевидно, что если, при некоторой температуре $t°$, $D = L - 2l$, и если при другой температуре $T°$, $D = L[1 + K(T-t)] - 2l[1 + K(T-t)]$, то $\frac{L}{2l} = \frac{K}{k}$, а потому $L = D\frac{K}{K-k}$ и $l = D\frac{1}{2}\frac{k}{K-k}$. Если $K = 2k$ (например, медь и стекло, алюминий и сталь, латунь и платина), то $L = 2D$ и $l = \frac{1}{2}D$, а потому тогда для метра придется взять нижнюю линейку в 2 метра, а верхние в $\frac{1}{2}$ метра. Для копий, однако, лучше удержать медные трубки, тем более, что на них можно нанести и доли метра, а сличать их с нормальным метром можно при какой угодно температуре. Указанным способом во всяком случае легко довести коэффициент расширения до всякого желаемого minimum'а или сделать $= 0$, ибо можно нанести на верхних линейках черты в таком месте, что их расстояние будет от нагревания сокращаться, а не увеличиваться, и это будет тогда, когда l будет больше, чем $D\,{}^1/_2\frac{k}{K-k}$. За лучшую комбинацию металлов я считаю литую сталь и серебро (если $D = 250$, то $L = 592$, $l = 171$), а для удобства обращения с нормальными мерами полагаю, что их должно делать не длинными, например, в ${}^1/_2$ или ${}^1/_4$ метра, тем более, что точнейшие измерения чаще приходится делать на небольшой длине и температуру удержать в такой мере легче, чем в длинной.

Вторая глава

О степени точности в определении зависимости между объемом и упругостью газов

§ 20

Сжимаемость газов обыкновенно выражается по отношению к данному газу при данной его температуре и при данном, исходном давлении P_0 так, что находится сперва при этом P_0, объем V_0, а потом для той же массы газа определяют при давлении P_i объем V_i, и сжимаемостью называется частное $\frac{P_0}{P_i}\frac{V_0}{V_i}$, которое по Бойль-Мариоттову закону $= 1$, а при существовании отступлений от него, оно $= 1 + X_i$. Так как: $V_0 : V_i = D_i : D_0$, где D есть плотность (то-есть масса, деленная на объем), то сжимаемость несколько общее выражается, определяя X_i из:

$$1 + X_i = \frac{P_0 D_i}{D_0 P_i}.$$

Здесь уже не предполагается тождество масс при определении сжимаемости, но все же величины X_i не имеют какого-либо общего, абсолютного значения, — это величины относительные; их можно сравнивать качественно между собою, но для перехода к количественной стороне дела потребуются новые данные. Если иметь в виду одно изучение существования отступлений от Мариоттова закона, то вышеприведенный способ выражения сжимаемости достаточен, но если идет речь о нахождении данных для определения упругости газов, то необходимо для выражения сжимаемости разных газов отыскать способ, менее относительный, в котором величины, выражающие сжимаемость, имели бы абсолютное значение, чтобы их можно было сравнивать между собою для разных газов и разных температур.

Упругость газов изменяется не только с изменением объема, но и с переменою природы газа и его температуры. Дабы выразить абсолютными величинами зависимость между объемом и упругостью, необходимо принять во внимание массу и температуру газа; однако в отдельных наблюдениях, где температура и масса остаются постоянными, можно значительно упростить дело определения искомой зависимости, как это и делалось в большинстве произведенных до сих пор исследований. Если считать законы Бойль-Мариотта и Гей-Люссака справедли-

выми и назвать чрез P — давление или упругость, T — температуру, V — объем и M — массу или, при постоянном напряжении тяжести, вес газа, то для данного газа зависимость этих величин, как известно, выразится равенством:

$$K_i PV = M(C_0 + T),$$

где коэффициент K_i постоянен для данного газа и зависит от его природы, а постоянное C_0 (так называемая температура абсолютного нуля) остается одинаковым для всех постоянных газов. Приняв во внимание закон Авогадро (Ампера и Жерара), по коему плотности газов пропорциональны весу их частиц, и называя чрез A_i частичный вес газа, точно определяемый путем химического исследования,[1] мы имеем по этому закону, что

$$K_i : A_i = K_0 : 1,$$

где K_0 для всех газов (считая их совершенными) есть величина постоянная, а потому:

$$K_0 A_i PV = M(C_0 + T). \qquad \text{I}$$

Такова самая общая формула, выражающая свойства *совершенного газа*; в ней с переменою природы газа меняется только A.[2] В опыте

---

[1] Если дана смесь газов, как, например, воздух, то, зная частичные веса и процентное (по объемам) содержание составных начал, разочтем для смеси соответственное значение A_i, которое выразит тогда средний частичный вес газовой смеси. Так, приняв, что воздух содержит 20,9 объемов кислорода и 79,1 азота и что для них частичные веса = 32 и 28, найдем, что для воздуха $A_i = 28{,}836$, как и принято в следующей таблице. Если в одном объеме смеси содержится q объемов газа, коего частичный вес A_0, и $1-q$ объемов газа A_i, то средний вес частиц газовой смеси $A_i = qA_0 + (1-q)A_i$.

[2] Привожу способ вывода этой формулы, потому что, хотя она по существу и тождественна с известною формулою механической теории теплоты [Клапейрон: $PV = R(C + T)$], но полнее ее и не содержит, как эта, опытной переменной R, зависящей от природы газа, а потому и общее ныне употребляемой. Возьмем два газа, частичные веса коих A_i и A_0, а веса 1-го литра при 0° и 0,76 м. давления суть R_i и R_0. Закон Авогадро и Ампера, приложенный к данным химии Жераром, гласит, что $A_i : A_0 = R_i : R_0$, то-есть, что частичные веса относятся как плотности при равных условиях, или что частичные веса занимают равные объемы. Отсюда $\frac{A_i}{R_i} = \frac{A_0}{R_0}$ = некоторой постоянной, которую назовем чрез Q. ледовательно $R_i = \frac{A_i}{Q}$. Если нам известно, что 1 литр первого газа при 0° и 0,76 м. весит R_i, то V_i литров этого газа при температуре T и давлении P_i будут, по законам Гей-Люссака и Мариотта, весить: $M_i = \frac{R_i V_i P_i}{0{,}76(1 + \alpha T_i)}$. Отсюда $R_i = \frac{M_i 0{,}76\left(\frac{1}{\alpha} + T_i\right)}{\frac{V_i P_i}{\alpha}}$. Приравнивая оба значения для R_i, получаем:

$$\frac{1}{\alpha 0{,}76 Q} A_i V_i P_i = M_i\left(\frac{1}{\alpha} + T_i\right).$$

можно менять: A_i, то-есть природу газа, ибо тогда его частичный вес переменяется, P, V, M и T, коэффициенты же K_0 и C_0 останутся постоянными, если в точности справедливы выше исчисленные законы. Численное значение K_0 и C_0 будет меняться при этом только от изменения единиц, в коих выразим A_i, P, V, M и T. Мы станем выражать в этой и следующих главах, где о том не будет особо сказано:

A_i то-есть *частичные* веса газов, принимая *атомный* вес водорода за единицу;

P в метрах высоты ртутного столба при 0°, считая при этом, что куб. сантиметр ртути в безвоздушном пространстве тогда весит 13,5959 грамма (по Реньо), и потому P = давлению P. 1359,59 грамма на квадратный сантиметр;

V в литрах или куб. дециметрах, считая, что литр воды при 4° весит 1 килограмм;[1]

M в миллиграммах; [2]

T — в градусах стоградусного термометра.

Избрав вышеуказанные единицы, по данным Реньо, [3] найдем, считая $C_0 = \frac{1}{\alpha}$, где α есть коэффициент кубического расширения газов, следующие значения K_0:

	A_i	P	V	M	T	C_0	$K_0 = \frac{M(C_0+T)}{A_iPV}$
Водород, H^2	2	0,76	1	89,578	0	273,15	16 098
Азот, N^2	28	0,76	1	1256,2	0	272,5	16 085
Кислород, O^2	32	0,76	1	1429,8	0	272,5	16 020
Окись углерода, CO	28	0,76	1	1251,7[4]	0	272,6	16 032
Углекислота, CO^2	44	0,76	1	1977,4	0	269,5	15 939
Воздух: 20,9 кислорода, 79,1 азота	28,836	0,76	1	1293,2	0	272,5	16 079

Дроби $\frac{1}{\alpha 0{,}76Q}$ и $\frac{1}{\alpha}$ суть постоянные величины, ибо α, по закону Гей-Люссака, считается постоянною, а потому их означим постоянными K_0 и C_0, чрез что и получим нашу формулу.

[1] По известным данным должно думать, однако, что нормальный килограмм не вполне равен весу кубического дециметра воды при 4°.

[2] Такую малую единицу веса мы избираем по причине значительной легкости газов и для того, чтобы K_0 вышло значительным.

[3] Для коэффициента расширения взяты числа, относящиеся к наблюдениям при постоянном давлении, ибо такие числа и должно взять, хотя числа, полученные Реньо, при постоянном объеме несомненно точнее, да и ближе для разных постоянных газов друг другу. Для азота и кислорода взят коэффициент расширения воздуха.

[4] Плотность окиси углерода 0,9679 взята средняя, по определениям Вреде и Маршана, она переведена затем в миллиграммы по удельному весу воздуха, данному Реньо.

Различия, замечаемые в C_0 и K_0, происходят, во-первых, от погрешностей в определении A, P, V, M и T, а во-вторых от неточности законов, служащих для вывода формулы I. Это последнее очевидно из того, что отступления от законов Бойль-Мариотта, Гей-Люссака и Авогадро-Ампера несомненно доказаны во множестве отдельных частных случаев. Нашу ближайшую цель составляет изучение отступлений от Бойль-Мариоттова закона и притом сперва для каждого газа в отдельности, а потому тогда A_i, C_0 и даже T_i можно считать величинами постоянными, если наблюдения делают при одной или очень близких температурах. Тогда величину

$$\frac{M}{V} \cdot \frac{1}{P_i} \cdot \frac{C_0 + T}{A_i}$$

должно определить при различных P; она не будет постоянною K_0, а будет некоторою функциею Y_i.

Итак искомое

$$Y_i = \frac{M}{V} \cdot \frac{1}{P_i} \cdot \frac{C_0 + T}{A_i} . \qquad \text{II}$$

Строго говоря, переменными при этом надо принять все величины второй части уравнения в каждом отдельном опыте, потому что: 1) масса газа M может изменяться или по самому условию опыта (например, у Наттерера) или потому, что часть газа сгущается на поверхности сосудов и оттого не подвергается сжимаемости при перемене давления; 2) объем V изменяется конечно или также по условиям опыта (как у Реньо), или уже от одного изменения давления, ибо сосуд с газом тогда меняет свою емкость; 3) T меняется от того, что практически невозможно с полной точностью удержать постоянно одну и ту же температуру; 4) C_0 есть величина, переменяющаяся (ибо закон Гей-Люссака не точен) как с природою газа, так и с *давлением* и температурою; и 5) наконец и A_i нельзя считать вполне постоянною величиною, если газ для опыта возобновляется, потому что ни за полную его чистоту, ни за совершенную однородность газа нельзя поручиться, при всем стремлении достичь этого.

Полное знакомство с законами изменения упругости газов получится тогда, когда для разных газов (то-есть с переменою A_i) найдется абсолютное Y_i при перемене T и P;[1] тогда можно будет надеяться открыть новые законы, управляющие упругостью газов, более точные, чем законы Мариотта и Гей-Люссака, а потому желательно, чтобы выражение сжимаемости было приведено в согласие с общим изучением упругости газов. Двух примеров будет достаточно для объяснения пользы такого изучения. Мы видели (§ 2), что есть повод думать, что при очень малых давлениях газы будут менее сжиматься, чем следует по закону Мариотта, ибо есть повод думать, что атмосферы

[1] Ныне нет повода думать, что Y меняется с переменою массы или объема газа, ни с переменою напряжения тяжести, но опыты, направленные на решение этого вопроса, могли бы иметь самостоятельный интерес.

небесных светил разнородны, то-есть ограничены, не диффундируют в небесное пространство. Если это подтвердится опытом, то $\frac{M}{PV}$ будет с увеличением давления (при малом P) уменьшаться. Но при этом $Y = \frac{M}{PV}\frac{C+T}{A_i}$ может оставаться постоянною величиною, если, единовременно с уменьшением сжимаемости, C будет возрастать. С другой стороны опыты Реньо показали, что $\frac{M}{PV}$, с возрастанием давления от 1-го до 5-ти метров, возрастает, а в то же время возрастает и коэффициент расширения, т. е. $\frac{C+T}{A_i}$ уменьшается. [1]

Таким образом вопрос об упругости газов при постоянной температуре, распадается на два отдельных вопроса: 1) вопрос о сжимаемости газов, то-есть об изменении $\frac{M}{PVA}$ с переменою давления, при постоянной T и при переменном P_i и 2) вопрос об изменении C, то-есть коэффициента расширения газов с переменою давления. Только тогда, когда оба эти вопроса будут разрешены для разных газов и температур — можно будет ждать решения первоначальных вопросов об упругости газов. Нашею задачею будет служить собрание данных для решения этих вопросов для обыкновенной температуры и для разных газов. Но мы для удобства дела разграничим оба поставленные вопроса и теперь займемся только первым из них.

Для выражения сжимаемости в абсолютных мерах станем делать T постоянною и примем пока C также за постоянную величину, придав ей такое значение, какое близко к найденному по определениям Реньо при обыкновенном давлении и при переменном объеме. Эту величину мы для всех газов принимаем в дальнейшем изложении при решении первого вопроса за $C_0 = 273$. С переменою P, определим тогда Y_i, оно будет $= \frac{M_i(C_0+T)}{V_iP_iA_i}$.

Когда затем при дальнейшем исследовании для данного давления P_i и для той же постоянной температуры T найдется α_i, а следовательно и C_i, тогда найденные прежде Y_i должно будет разделить на C_0+T и умножить на C_i+T, чтобы получить истинное значение Y_p зависимости между упругостью и объемом газа при T:

$$Y_p = Y_i\frac{C_i+T}{S_0+T}.$$

---

[1] Однако C уменьшается быстрее, чем $\frac{M}{PV}$ увеличивается, так что Y не получает постоянного значения с переменою P. Так для воздуха при $P=$ $= 1$ метру (см. § 6) $\frac{M}{PV} = 1\,671$, при $P = 5$, оно $= 1\,679$, значение же C при $P = 1$ есть 272, при $P = 5$, $C = 268$, а потому (опыты были при $T = 5$) $Y_1 : Y_5 =$ $= 1\,671\,(272+5) : 1\,679\,(268+5) = 1\,000 : 990$.

При таком способе выражения, результаты наблюдений над сжимаемостью получат абсолютное значение и, что всего важнее, постоянно будет в виду то обстоятельство, что вопрос о сжимаемости есть только часть более общего вопроса об упругости газов. В общей своей форме Y должно считать переменною с изменением природы газа, T и P, что мы означим Y_{itp} и притом:

$$Y_{itp} = \frac{D_{itp}}{PA_i}[C_{itp} + T],$$

ибо C изменяется, как Y и D, с природою газа и с переменою T и P. Зная D_{itp} и C_{itp} найдем Y_{itp}. Эту сложную задачу можно разделить на три: 1) сперва узнать перемену D с переменою давления и природы газа, при постоянной T; 2) потом перемену C с изменением природы газа и давления, при данной T,[1] тогда определится Y_{ip}, а наконец, 3) узнать изменение D и C с переменою T. Эта последняя задача[2] самая сложная, но ее мы не имеем в виду при предпринятом нами ныне исследовании, потому что нахождение Y_{ip} при разных давлениях для разных газов, при постоянной температуре само по себе составляет очень сложный вопрос, *об упругости газов*, опытное разрешение которого, при сколько-либо широких изменениях давлений, представляет значительные практические трудности. Итак должно избрать некоторую температуру, при коей должны быть произведены все наши исследования. За такую температуру я избираю одну из обыкновенных наших комнатных температур, чтобы легчайшим образом можно было достигать ее постоянства и однообразия. Но для того, чтобы иметь возможность воспроизвести ее каждый раз и узнать ее величину помимо тех сравненных чувствительных термометров, по которым мне практически легко будет ее возобновлять, я должен был обратиться к вопросу о точном выражении обыкновенных температур, который специально рассматривается в особой главе этого отчета. Предпочтение, отданное мною обыкновенной температуре пред температурою тающего льда, основывается не только на том, что первую удобнее получить и удерживать, но еще и на том: 1) что температура тающего льда, как известно всем практически занимающимся точными термометрическими определениями, в практике дает, без соблюдения многих предосторожностей, погрешность в 0,01 и даже 0,02° Ц, которая легко определяется чувствительным термометром, а потому и в тающем льде пришлось бы держать чувствительный термометр и руководствоваться его показаниями; 2) в ваннах, содержащих большие сосуды, необходимо производить перемешивание, если желательно иметь равномер-

[1] Определяя коэффициент расширения газа в тесном пределе от $T-t$ до $T+t$, мы найдем значение его при T, подобно тому, как то можно сделать и для жидкого тела. Точнейшее решение вопроса требует узнать эмпирический закон изменения объема от температуры и тогда определить искомый коэффициент, но так как температуры определяются по изменению объема или давления газов и газы расширяются почти одинаково, то и первый способ даст очень точное число.

[2] Она едва затронута в исследованиях Амага. Буквою D мы здесь означаем плотность.

ность температуры, а со льдом это очень затруднительно; 3) при определении C необходимо будет изменять температуру и тогда предполагается мною, исходя от обыкновенной температуры T, определить коэффициент расширения до 0° и до 2 T, чтобы иметь средний коэффициент при T; 4) наконец сосуды со сжатым при 0° газом придется взвешивать при обыкновенной температуре, а следовательно долго ждать его нагревания, а это может повести к новым погрешностям, трудно определяемым.

Итак первую нашу задачу составляет определение сжимаемости, то-есть, определение

$$Y_{1p} = \frac{M}{VP} N, \quad \text{где } N = \frac{273 + T}{A_1}. \qquad III$$

Хотя Y_{1p} близко к постоянной величине 16 100, но есть величина переменная, при существовании отступлений от Бойль-Мариоттова закона. Отсюда очевидно уже, что для данного газа, при постоянном N, должно иметь хотя два определения M и V при различных P, чтобы получить понятие о существовании неточности Бойль-Мариоттова закона.

§ 21

Назовем данные первого определения, исправленные на малое изменение температуры и состава, чрез M_1, V_1, P_1, а данные второго определения чрез M_2, V_2, P_2, и получим:

$$Y_1 = \frac{M_1}{V_1} \frac{1}{P_1} N \quad \text{и} \quad Y_2 = \frac{M_2}{V_2} \frac{1}{P_2} N.$$

Пусть $Y_2 = Y_1 + a$, очевидно, что весь вопрос сводится на определение a, но в Y_1 и в Y_2 заключаются не только 16 100 + отступления от закона Мариотта, которые назовем a_1 и a_2, которые гораздо меньше 16 100, но еще и погрешности в определениях M, V, P и N, а потому необходимо знать меру возможных погрешностей в определении Y_1 и Y_2, чтобы с точностью судить о мере отступления газа от Бойль-Мариоттова закона. Называя чрез m_1, v_1, p_1 и n_1, погрешности в M_1, V_1, P_1 и N и соответственные погрешности во втором наблюдении m_2, v_2, p_2 и n_2, должно, зная их, определить погрешности y_1 и y_2 в Y_1 и Y_2, чтобы затем иметь возможность узнать существование (качество), меру и погрешность отступлений от Бойль-Мариоттова закона. Этому вопросу и посвящается текущая глава, ибо от него зависит направление опытов.

По принятому означению очевидно, что:

$$Y_1 \pm y_1 = \frac{M_1 \pm m_1}{V_1 \pm v_1} \frac{(N \pm n)}{P_1 \pm p_1}, \qquad IV$$

где значения погрешностей, конечно, должно принять гораздо меньшими значения самых величин, которым они отвечают, ибо иначе определения вовсе не будут отвечать своей цели. Разлагая дроби второй части IV в строки, пренебрегая членами высших порядков и взявши

с $+m_1$, n_1, а v_1 и p_1 оставляя с —, мы получим, очевидно, $+y_1$, т. е. наибольшую положительную погрешность, которую можно ждать в Y_1: [1]

$$Y_1 + y_1 = \frac{(M_1 + m_1)(N + n)\left(1 + \frac{v_1}{V_1}\right)\left(1 + \frac{p_1}{p_1}\right)}{V_1 P_1} =$$

$$= \frac{M_1 N + N m_1 + n M_1 + \frac{M_1 N}{V_1} v_1 + \frac{M_1 N}{P_1} p_1}{P_1 V_1},$$

а так как $Y_1 = \frac{M_1 N}{V_1 P_1}$, то,

$$\frac{y_1}{Y_1} = \frac{m_1}{M_1} + \frac{n}{N} + \frac{v_1}{V_1} + \frac{p_1}{P_1}. \qquad \text{V}$$

Так как V_1 и M_1 суть величины зависимые, то одну из них можно исключить:

$$y_1 = Y_1\left[\frac{m_1}{M_1} + \frac{n}{N} + \frac{Y_1 P_1}{M_1 N} v_1 + \frac{p_1}{P_1}\right].$$

Приняв Y_1 за постоянную, ибо она близка к ней, и взяв от y_1 производную на M_1, имеем:

$$\frac{\mathrm{d}(y_1)}{\mathrm{d}(M_1)} = Y_1\left(-\frac{m_1}{M_1^2} - \frac{Y_1 P_1 v_1}{\mathrm{N}} \frac{1}{M_1^2}\right).$$

Приравняв эту производную 0, видим, что нет такого M, при коем y_1 получало бы наименьшее значение, следовательно: уменьшая m, n, v и p и увеличивая M, V и P, мы будем уменьшать y_1; но дело здесь в том, что погрешности суть величины, отчасти зависимые от самых определяемых чисел, а потому надо сперва рассмотреть эту зависимость, а потом уже делать суждения о практическом применении формулы V.

Поэтому рассмотрим первоначально приемы, дающие возможность определить значение погрешностей m, p, v и n, потому что из них слагается погрешность y.

Погрешность m есть погрешность взвешивания газа в миллиграммах. Вес же газа определяется чрез разность двух взвешиваний: сосуда почти пустого и сосуда с газом и чрез поправку полученного веса на вес вытесненного воздуха. Так как чувствительность весов вообще мало меняется с нагрузкою, а газ, заключенный в сосуд, весит вообще мало сравнительно с весом сосуда, и так как возможно (стр. 29[=274]) иметь всегда одну и ту же навеску, то погрешность двух взвешиваний, дающих чрез разность вес газа, должно положить равною двойной погрешности одного взвешивания. Эту последнюю назовем m_0; она должна быть определена при изучении весов, а именно при проверке гирь, если последние взвешиваются тем же способом, как и сосуд с газом. Если при взвешивании употребляется способ Гаусса, то m_0 можно принять равною чувствительности весов. Погрешность, вводимая чрез поправку на вес вытесненного воздуха, может быть гораздо значительнее предшествующей, если не употребить способа Реньо, состоящего в тариро-

[1] [В подлиннике опечатка Y_1. *Прим. ред.*].

вании сосуда с газом равнообъемным пустым сосудом. Но и при этом, наиболее надежном способе должно ждать от поправки погрешности по крайней мере равной $2m_0$, потому что при определении равнообъемности двух сосудов необходимо, по крайней мере, два взвешивания, да прикладывание гирь для окончательного приравнивания. Поэтому, если чувствительность весов $= m_0$, то погрешность m_1 нельзя в единичном определении считать меньшею, чем $4m_0$. При этом предполагается, что гири проверены на весах, гораздо более чувствительных, чем те, которые служат для взвешивания, ибо иначе в весе будет погрешность еще $= m_0$, умноженной на число гирь. Если применяется способ Реньо для определения плотностей газов, то сосуд для газа сперва освобождается от воздуха и газа насосом и взвешивается в этом состоянии, причем вводится поправка на вес оставшегося газа, считая применимым закон Мариотта. Это допущение справедливо в пределе точности наблюдения только тогда, если газ имеет действительно ничтожную плотность, а иначе ведет к значительной погрешности. Наблюдения, сделанные мною и Кирпичевым,[1] показывают для воздуха, что, приняв PV при атмосферном давлении $= 10$, при давлении в 1 мм. это произведение приблизительно $= 6$, а следовательно, можно рассчесть погрешность, вводимую вышеуказанным допущением. Пусть емкость сосуда близка к 20 литрам и вес воздуха при давлении 800 мм. $=$ $= 24$ граммам, по закону Мариотта вес воздуха при том же объеме, при давлении 1 миллиметр $= 30$ миллиграммам, а если допустить, что PV изменяется, как указано выше, то он будет $= 50$ миллиграммам. Если взвешивание будет произведено тогда, когда упругость оставшегося воздуха будет 0,02 миллиметра, какой можно достичь только при помощи ртутных насосов, то и тогда по Мариоттову закону поправка $= 0{,}6$ миллиграмма, а потому необходимо получать пустоту, возможно совершенную, и от несоблюдения этого условия, если сжимаемость газов при очень малых давлениях еще неизвестна, может вкрасться погрешность весьма значительная. Реньо, при определении плотностей газов, имел погрешность, достигавшую до $^1/_{1000}$, вероятно, главным образом именно потому, что не подозревал вышеизложенного обстоятельства.

Итак, допуская соблюдение всех необходимых предосторожностей, все-таки погрешность взвешивания необходимо принять равною четверной абсолютной чувствительности весов. А так как взвешиваемый большой сосуд с газом должен (§ 14) иметь большой вес, то эту последнюю нельзя принять меньше 0,2—0,1 миллиграмма, а следовательно, m_1 должно принять от 0,8 до 0,4 миллиграмма, при расчете возможной для достижения степени точности в определении Y_1.

Погрешность n в значении величины N слагается из совокупности трех родов погрешностей, так как чрез N мы означили $\frac{C_0+T}{A_1}$, ибо в C_0, T и A_1 должны быть погрешности. Если бы мы стали здесь раз-

[1] Bulletin de l'Academie de St-Petersbourg 1874, т. IX, Avril, p. 466. Журн. Русск. Хим. Общ. 1874, I—124, II—72.

бирать все обстоятельства, влияющие на определение указанных величин, то далеко отошли бы от вопроса, составляющего ближайший предмет этого исследования, а потому, оставляя предмет этот до другой главы (где рассмотрим определение температур и коэффициентов расширения газов), заметим здесь только наиболее существенное.

Величина $C_0 = \frac{1}{\alpha}$, а α неодинаково для разных газов (Реньо), при разных температурах (Амага), при разных давлениях (Реньо) и смотря по тому, как оно определено: при постоянном давлении или при постоянном объеме (Реньо). Достаточно этого последнего обстоятельства, чтобы в C_0 вкралась погрешность $= 0{,}4$ (что влечет в N погрешность $n = 0{,}014$ для воздуха), ибо для воздуха α при постоянном объеме $= 0{,}003665$, а при постоянном давлении $= 0{,}003670$.[1] Если же прибавить погрешность в T и A_1, то нельзя сомневаться в том, что n превосходит 0,02 для воздуха и 0,2 для водорода; но так как при данном газе погрешность эта остается одною и тою же, если T определено с одинаковою точностью, и так как ныне нет других точнейших данных, чем те, которые дает Реньо, а по изменении их можно ввести всегда поправку, то для определения n мы будем руководствоваться только погрешностью температуры, считая, что C_0 взято пока (§ 21) условно за постоянную, а A_1 по исправлении на состав газа зависит от атомных весов, кои всегда могут быть затем исправлены. Что касается до погрешности t в T, то эту последнюю в достаточно большой ванне и при над-

---

[1] Считаю не излишним рассмотреть, от чего зависит различие коэффициентов α при постоянном давлении и α_1 при постоянном объеме. Вероятнее всего предположить, что причина состоит в отступлении от Мариоттова закона. И это действительно так, что можно проверить для воздуха, для коего Реньо дает $\alpha = 0{,}003670$ и его же наблюдения для 5° дают в среднем выводе для изменения сжимаемости выражение: $p_i v_i = 10\,000 - 15(p_i - 0{,}76)$, где p_i есть давление, а $p_i v_i$ соответственное произведение из давления на объем (это выражение выведено мною из данных, помещенных в 1-й главе; оно справедливо в пределе до $p_i = 8$ метрам). Предположим, что взят при давлении 1 метр и при 0° объем воздуха V_0; при том же давлении при 100° объем будет (по α) $V_0 1{,}367$; спрашивается (для определения α_1), какое давление будет иметь воздух при 0°, если его объем из V_0 превратить в $1{,}367\ V_0$? По вышеприведенному выражению сжимаемости найдем его, называя искомое давление X, соответственный ему объем $1{,}367\ V_0$; давлению же 1 метр отвечает объем V_0 и $pv = 9996{,}4$, следовательно:

$$XV_0\ \ 1{,}367 : V_0 = 10\,000 - 15\,(X - 0{,}76) : 9996{,}4,$$

откуда находим $X = 0{,}73182$. Следовательно, при том же объеме воздух, имеющий при 0° давление 731,82 мм., при 100° будет иметь давление 1000 мм., откуда выводим значение $\alpha_1 = \frac{1000 - 731{,}82}{73\ 172} = 0{,}003665$. Прямой опыт дает то же самое значение α_1. (Должно заметить, однако, что при высших давлениях совпадение становится все менее и менее удовлетворительно). Следовательно, определяя различие α и α_1, можно, обратно, узнать существование и определить меру отступлений от Мариоттова закона. Этим путем я предполагаю воспользоваться в своем исследовании, а теперь замечу, что различие α и α_1, по данным Реньо, для CO^2 и SO^2 еще более, чем для воздуха, но также α более α_1. Обратное (α менее α_1) замечается только для водорода, и это согласно с тем, что он отступает от закона Мариотта в другую сторону, чем воздух и другие газы. Впоследствии мы подробнее рассмотрим все обстоятельства, сюда относящиеся.

лежащем устройстве мешалки можно поддерживать с точностью до 0,01° Ц, а определять можно с еще бо́льшею точностью, а потому, называя чрез t погрешность температуры, мы получим, что второй член в V уравнении равен $\frac{t}{A_1 N}$, а как $N = \frac{C_0 + T}{A_1}$, то этот член равен $\frac{t}{C_0 + T}$. Приняв t = 0,005, а $C_0 + T$ за 290 (обыкн. температура), мы будем иметь от этого члена столь малую погрешность, что ею можем, сравнительно с многими другими, пренебречь, тем не менее мы вводим ее в расчет при определении значения y.

Погрешность v_1 в определении объема газа состоит не только в погрешности первоначального определения объемов, но еще и в изменении этого объема от изменения давления и температуры. Эту последнюю величину, однако, можно сделать действительно ничтожно малою, соблюдая легко достижимое условие — чтобы все определения (емкости сосуда и плотности газа при разных давлениях) были производимы при температурах, весьма близких, а на малые разности температур делать поправки. Пусть, например, стеклянный сосуд имеет емкость 10 литров, а объем его определен при температуре T, плотность же газа при температуре $T \pm 0{,}02$, определенной с точностью $\pm 0{,}005$. Поправка объема будет $10\,(1 \pm k \cdot 0{,}02)$ с точностью до $\pm 10\,k \cdot 0{,}005 = \pm 0{,}000002$, хотя бы в коэффициенте расширения стекла k и была погрешность $\pm 0{,}000002$, а такой погрешности легко избежать. Гораздо сложнее и труднее определять поправки на изменение емкости сосуда с переменою давления. Эта последняя при сосудах значительной емкости сравнительно весьма значительна, чтобы ею можно было пренебрегать, хотя Реньо при опытах над газами под малыми давлениями,[1] равно как и при опытах над сжатыми газами,[2] обошел эту поправку. Для каждого сосуда, емкость коего определена при давлении атмосферном, требуется знать k_0 — коэффициент изменения 1-го объема при изменении давления на 1 метр и тогда должная поправка $= k_0 (P_1 - 0{,}76) V_1$. Величина k_0 узнается рядом отдельных определений. Взяв стеклянный шарообразный сосуд со стенками толщиною в 1,5 миллиметра, а емкостью около 4 литров, легко определить изменение емкости при изменении давления (снаружи или изнутри) даже на 1 миллиметр ртутного столба; но такой шар едва выдерживает давление 2—3 атмосфер, а потому поправка его объема на изменение все-таки невелика и может быть очень точно определена. То же относится и до сосудов или трубок, назначенных для определения плотности при значительных давлениях. Значительная точность в определении сжимаемости сосудов, назначенных для опыта, может быть достигнута только при значительном объеме сосудов, потому что к ним можно приделать капиллярную трубку не чрезчур тонкую, ибо иначе в этой последней

[1] Relations etc. I—139.

[2] Там же, стр. 365, 366. Высшая найденная им поправка = 0,00017 v при 20 атмосферах. Она мала, потому что взята была трубка малого диаметра. В опытах Реньо она была более этой величины, потому что в трубку при опытах был вмастичен кран. Следовало определить поправку в самом сосуде, то есть в трубке с краном;

мениск жидкости будет представлять различное и значительное давление. Так как прямой опыт показал мне, что для стеклянных и стальных сосудов можно, в пределе точности наблюдения, принять изменение емкости пропорциональным изменению давления, то несколько определений, сделанных для данного сосуда, могут дать весьма точно коэффициент сжимаемости сосуда. Сверх того указанная пропорциональность дает возможность обойтись без знания сжимаемости жидкостей,[1] производя давление на *внешнюю* поверхность изучаемого сосуда и судя о сжимаемости по изменению уровня (в капиллярной трубке) жидкости, налитой внутрь сосуда. Этими приемами определение коэффициента сжимаемости сосуда можно довести до такой точности, что погрешность будет гораздо меньше главной погрешности при определении объемов, к рассмотрению которой теперь и перейдем. Емкость сосуда V_1 (при температуре наблюдения) определяется, очевидно, весом воды или ртути, вмещающихся в сосуд. Ртуть в большинстве случаев заслуживает предпочтения не только потому, что ее коэффициент расширения известен лучше, чем для воды, но особенно потому, что она может быть взвешена по частям,[2] а потому с бо́льшею точностью на весах с значительной чувствительностью. Но применение этого способа не всегда возможно и особенно трудно при больших сосудах, а потому рассмотрим погрешность от определения емкости водою. При этом вкрадываются три погрешности: от способа отделения определенного объема, от взвешивания и от неточности сведений об изменении плотностей воды с температурою. Назовем первую погрешность (v_0), вторую (vm), третью (vt). Погрешность (v_0) хотя может быть сделана меньше всякой другой, но в практике иногда бывает значительна, ибо зависит от способа отчитывания объема. Если для этой цели отчитывается стояние ртути в трубке, имеющей сечение a, как то делает, например, Реньо в своих исследованиях над сжимаемостью газов, то погрешность состоит из суммы $ap_1 + b$, где p_1 есть погрешность в отчитывании положения верхней точки ртутного мениска (а в опытах Реньо, где a близко к 1 квадратному сантиметру, p_1 нельзя принять меньше 0,05 миллиметра) и b есть изменение ёмкости мениска. Последняя величина сравнительно очень значительна, потому что ртутный мениск в трубках сколько-либо широких [3] значительно меняет свою емкость и поправка, при современном запасе данных, недостоверна. Прямой опыт показал мне, что в трубках с диаметром от 0,6 до 2,0 сантиметра высота мениска может изменяться при одном диаметре даже, если ртуть совершенно чиста, от 0,4 до 1,4 миллиметра, смотря по тому, отливается или приливается ртуть в трубку. Приняв при этом диаметр = 1 сантиметру и считая мениски отрезками шара, разочтем, что для газа остается

---

[1] Что важно по той причине, что наши знания о сжимаемости жидкостей еще довольно шатки. (См. выноску 5 на стр. 36 [=2 на стр. 284]).

[2] Взвешивать воду по частям нельзя, потому что при выливании она испаряется и прилипает к стенкам.

[3] А узких здесь часто взять нельзя, потому что иначе давление мениска будет значительно и неопределенно. Так у Реньо трубка имела диаметр, близкий к 1 сантиметру.

емкость от нижней части мениска до верхней от 0,016 до 0,052 [1] кубических сантиметра, а следовательно, $b = 0{,}036$ куб. сант. По причине этой одной погрешности должно считать мало точными все способы, в которых определение объемов, занятых газом, производится по положению ртути в трубке, сколько-либо широкой, если при этом высота мениска не измеряется и не приводится всегда приблизительно к одной и той же. Если же запирание газа производится ртутью, находящеюся в капиллярной трубке, то можно достичь значительной точности и не измеряя высоту мениска. Гораздо надежнее те способы, в которых газ и жидкость, назначенную для определения емкости, запирают для взвешивания краном, особенно винтовым, потому что тогда открывается каждый раз действительно возможно одинаковый объем, а потому тогда (v_0) можно считать $= 0$, если только есть полное убеждение в том, что жидкость, при наполнении ею, так же в совершенстве наполняет сосуд, как и газ. Этого не будет, если пузырьки газа останутся на стенках сосуда. Для избежания их необходимо наполнение водою или ртутью производить, вполне выкачивая воздух из сосуда, и притом, приливая жидкость снизу. Кипячение невозможно, если в состав прибора входит кран, укрепленный мастикою, а потому этим путем может вкрасться немаловажная погрешность. В своем месте будут указаны приемы, употребленные мною и дающие уверенность в совершенстве наполнения сосуда жидкостью, что особенно важно при определении емкости металлических сосудов, а потому погрешность (v_0) при дальнейшем расчете я принял $= 0$.

Вторая погрешность (vm) — есть погрешность веса сосуда с водою. Если емкость его не велика, то его можно взвешивать на тех же весах, как и сосуд с газом,[2] но если она значительна, то потребуются весы для бо́льшей нагрузки и тогда (vm) будет гораздо больше m_0, то-есть чувствительности весов, назначенных для взвешивания газа. Последний случай встречается в исследованиях Реньо, [3] и для определения погрешности (vm) надо принять этот наиболее вероятный случай. Так, если сосуд сам по себе весит 2—3 килограмма, а емкость имеет 10—20 литров, то вес его с водою (12—23 кило) будет столь велик, что придется взять весы, гораздо более грубые, чем для взвешивания газа. Такие весы, если их нарочно не выполнить для исследований [4]

---

[1] Емкость шарового мениска или сферического сегмента, коего высота $= h$, а радиус основания $= R$ равна $\frac{\pi h^3}{6}\left(1 + 3\frac{R^2}{h^2}\right)$, а емкость, остающаяся от цилиндра (высотою h, радиуса R) при вычете емкости мениска $= \frac{\pi h}{6}(3R^2 - h^2)$.

[2] Так стальной сосуд весом около 4 кг. и емкостью $1^1/_2$ литра (§ 14), будет с водою весить около $5^1/_2$ кг., а следовательно может быть взвешиваем на проектированных весах (§ 15).

[3] Relations etc. I. p. 129 и 152.

[4] Я проектировал для вышеуказанной цели, а также для определения коэффициента расширения воды и веса кубического дециметра ее весы, которые, по расчету, должны быть чувствительны до 1 миллиграмма при нагрузке в 100 килограммов, но выполнение их требует таких значительных средств, какие не находятся в моем распоряжении.

обыкновенно едва показывают сантиграмм, а потому необходимо принять 0,02 куб. сант. за предел точности (vm), а потому (в литрах) далее (vm) принято = 0,00002, в том случае, когда для определении объема приходится взвешивать сосуд с водою, весящий более 6 килограммов. Что касается до третьей погрешности (vt) объема, то она имеет значение относительное и так как погрешность эта, рассмотренная мною при другом случае,[1] может быть впоследствии исправлена, если станут известны числа, выражающие расширение воды с большею точностью, чем ныне, то этою погрешностью, сравнительно с предшествующею, можно пренебречь, тем более, что можно выразить все объемы в весе воды одной определенной температуры. Пусть, например, емкость шара определяется по весу воды при температуре 15° и пусть шар имеет значительный объем (при меньшем объеме погрешность, очевидно, будет меньшая), около 25 литров, так что вес вмещающейся воды равен 25 килограммам (при 15°). Погрешность от взвешивания будет, по предшествующему, = ± 0,02 грамма, а если ошибемся в определении температуры на ± 0,°005, то сделаем погрешность = ±0,018; если шар будет в 2 литра, то (vt) = ±0,0015, а если температура будет ниже, то погрешность будет меньше, потому что тогда коэффициент расширения воды значительно уменьшается. Необходимо, однако, для точности данных привести ту таблицу изменения плотностей воды, которая принята в исследовании,[2] что и сделано мною в конце этой главы (§ 27), для того чтобы впоследствии можно было сделать поправку, если расширение воды будет точнее известно, чем ныне. На основании изложенного выше (vt) должно принять равною V_1k_2t, где k_2 есть коэффициент расширения воды при температуре, избранной за нормальную, t = погрешности в определении температуры, а V_1 есть объем.

Нам остается рассмотреть погрешность p_1 в определении давлений. Величину ее нельзя принять ни абсолютно — ни относительно — одинаковою. В самом деле, при давлениях, близких к 1 метру или к 1 атмосфере, можно делать определения, весьма точные, если применить способ компарации (гл. I) с выверенным метром. Тогда, как показывают опыты, излагаемые в исследовании сжимаемости под малыми давлениями, можно полагать $p_1 = \pm 0{,}02$ миллиметра. Это составит при $p = 1$ относительную погрешность $\frac{p_1}{P_1} = \pm 0{,}00002$. Если ту же абсолютную погрешность принять и при давлении в 100 мм., то относительное ее значение будет больше. При давлениях, весьма малых (например, 0 — 10 мм.), когда можно довольствоваться окулярным микрометром, абсолютная погрешность будет меньше, ее можно принять в 0,005 миллиметра, но относительная опять изменяется. Погрешность в измерении больших давлений в наших опытах можно считать пропорциональною давлениям, потому что высота ртутного столба определится из суммы высот отдельных столбов ртути высотою около 3,5 метра (§ 11).

---

[1] «О соединении спирта с водою» 1865, стр. 40, 41.

[2] К сожалению многие исследователи не делают такого указания, что иногда лишает возможности пользоваться их наблюдениями.

Сравнение основной меры с нормальным метром можно сделать точным до 0,02 миллиметра, а сравнение ртутных столбов с этою мерою едва ли можно сделать точнее как до 0,08, потому что придется делать определения скоро, а потому на каждый столб ртути надо допустить погрешность = 0,1 мм. Эта абсолютная погрешность дает относительную погрешность $\frac{0,1}{3\,300} = 0,00003$, которая останется постоянною до давлений в 50—60 метров. Итак при давлении около $P_1 = 0,005$ метра относительная погрешность $\frac{p_1}{P_1} = 0,001$, при $P_1 = 1$, $\frac{p_1}{P_1} = 0,00002$, при давлениях более 3,5 метра она = 0,00003, а потому можно принять, что до $P_1 = 1$ метру относительная погрешность $\frac{p_1}{P_1} = 0,00105 - 0,000985\,P_1$, а затем до $P_1 = 60$ она = 0,00003. В измеряемой величине ртутных столбов надо произвести три поправки: на капиллярную депрессию, на упругость газа, действующего на другой конец ртутного столба, и на температуру ртути. Капиллярная поправка уменьшится до весьма малой величины при соблюдении того условия, чтобы оба мениска, расстояние коих измеряется, были в трубках приблизительно одного диаметра, и чтобы они имели приблизительно одну и ту же величину (см. § 10); сверх того при малых давлениях возможно взять трубки больших диаметров. Следовательно поправку, а потому и погрешность этого рода, можно сделать ничтожною сравнительно с другими. Что касается до поправки на упругость газа, действующего на другой конец манометра, служащего для измерения давления, то при малых давлениях предполагается применить (§ 10) для этой цели прямо барометр, а последний можно легко выверить в отношении его абсолютности, или найти должную поправку, а потому тогда не должно ждать увеличения погрешности противу той (0,00002 метра), какую мы принимаем для барометра. При высоких же давлениях, если и прибавится погрешность от того, что давление определится суммою высот ртутных столбов в манометре и барометре, то эта прибавка не будет иметь значения на относительную величину $\frac{p}{P}$. Это тем более справедливо, что для наблюдения за малыми изменениями барометрического давления я устроил особый дифференциальный барометр, которого наблюдения очень скоры и легки и который будет описан в особой главе этой части отчета об опытах над упругостью газов. Но в опытах, которые производились до сих пор (Араго и Дюлонгом, Пулье, Депре, Реньо, Амага и др.), погрешность, рассматриваемая здесь, имеет большое относительное значение при давлениях, близких к атмосферному, а потому и упомянута здесь. Самое трудное дело в точном определении давлений есть поправка на температуру ртути. Я опишу впоследствии приемы, какие употребил и испробовал для этой цели как при барометре, так и при манометре, но, хотя приемы эти может быть и улучшают дело определения температур ртутных столбов, все же я думаю, что точность определения не превышает 0,1° Ц, а такая погрешность соответствует 0,00002 в относительной ве-

личине определения давлений. Поэтому погрешность p_1 состоит из суммы абсолютной погрешности p_i в определении давления и из относительной погрешности от определения температуры ртути. Эта последняя при давлении P_1 равна $P_1 0{,}00018\, t_1$, если t_1 есть погрешность в определении температуры ртути. Абсолютная же погрешность $p_i = P_1 p_2$, где p_2 есть относительная погрешность.

§23

Предварительное рассмотрение всех главных обстоятельств, могущих влиять на точность результата, я считаю всегда необходимым предпосылать описанию опытов, потому что весьма важно дать себе отчет в ожидаемой степени точности данных, получаемых опытом, чтобы можно было затем видеть, *сличая отдельные данные, получаемые при повторении одного и того же определения*, на сколько вероятная погрешность, находимая этим путем, приближается к ожидаемой погрешности. Если окажется, что *действительная погрешность отдельных определений находится в пределе возможных погрешностей*, тогда только получится убеждение в том, что все обстоятельства, влияющие на результат, приняты во внимание. Без этого совпадения пределов погрешностей нет и не может быть уверенности в численных результатах. Одно простое сличение отдельных наблюдений между собою, дающее возможность узнать, так называемую, вероятную погрешность, не всегда дает уверенность в числах, ибо показывает только тождество или близость обстоятельств опыта, а не указывает на то, что все влияющие обстоятельства приняты во внимание. Постараемся же теперь, сведя вышеизложенное, определить, какую погрешность можно ожидать в числе Y_1 для воздуха и водорода при разных давлениях, в условиях, возможных для достижения при проектированных мною опытах. Удерживая обозначения и единицы меры предшествующих параграфов, мы имеем:

$$Y_1 = \frac{M_1 (C_0 + T_1)}{V_1 P_1 A_1}\ ^1 \qquad \text{II}$$

$$y_1 = Y_1 \frac{m_1}{M_1} + \frac{n}{N} + \frac{v_1}{V_1} + \frac{p_1}{P_1}. \qquad \text{V}$$

$m_1 = 4 m_0$, где $m_0 =$ чувствительности весов.

$n = \frac{t}{A_1}$, где $t =$ погрешности в температуре газа.

$v_1 = (vm) + V_1 (k_2 - k_1) t$, где (vm) есть погрешность взвешивания сосуда с водою, $(k_2 - k_1)$ есть разность коэфф. расширения воды и сосуда.

$p_1 = P_1 (0{,}00018\, t_1 + p_2)$, где 0,00018 есть коэффициент расширения ртути, t_1 есть погрешность в определении ее температуры, а p_2 есть относительная погрешность определения давлений.

---

[1] Припомним, что малыми буквами мы означаем наибольшие абсолютные ожидаемые погрешности в величинах, означенных большими буквами и что $N = \frac{C_0 + T}{A_1}$.

Если пренебречь некоторыми поправками, то очевидно, что они прибавятся к погрешностям. Так если пренебречь поправкою в изменении ёмкости сосуда при перемене давления, то к значению v_1 надо прибавить еще $k_0V_1(P_1 - 0{,}76)$.

Подставляя выражения для m_1, n, v_1 и p_1 в V, исключая по II величину M_1, получим:

$$y_1 = 4\,\frac{C_0+T_1}{V_1P_1A_1}\,m_0 + \frac{Y_1}{C_0+T_1}\,t + Y_1\left[\frac{(vm)}{V_1} + (k_2-k_1)\,t\right] + \\ + Y_1(0{,}00018\,t_1 + p_2). \qquad \text{VI}$$

Так как определения, предполагаемые нами, относятся до обыкновенных температур, то $C_0 + T_1$ можно принять за $273 + 17 = 290$, а так как теперь мы сделаем расчет давлений, не превышающих 60 м., когда изменения Y_1 незначительны, то подставим вместо Y_1 величину 16 000. Так как весовой способ мы предполагаем применять только при давлениях значительных, а именно бóльших, чем 0,5 метра, то p_2 (равное $\frac{p_1}{P_1}$) можно принять $= 0{,}00003$ (тогда абсолютная погрешность при $P = 0{,}5$ будет 0,015 мм., при $P = 0{,}75$ она будет 0,022 мм., что близко к действительности, как было говорено выше). Сверх того, судя по вышеизложенному, примем для того случая, когда V_1 более 2 литров, $m_0 = 0{,}2$; $t = 0{,}005$; $(vm) = 0{,}00002$; $(k_2 - k_1) = 0{,}00016 - 0{,}00002$; $t_1 = 0{,}1$; тогда получим для наших опытов (в больших стеклянных шарах) вероятную ожидаемую погрешность:

$$y_1 = \frac{232}{V_1P_1A_1} + 0{,}28 + \frac{0{,}32}{V_1} + 0{,}01 + 0{,}77$$

или

$$y_1 = \frac{232}{V_1P_1A_1} + \frac{0{,}32}{V_1} + 1{,}06. \qquad \text{VII}$$

Так как большие стеклянные шары (более двух литров) не могут выдерживать давлений больше 4—6 метров, как показывает опыт, то разочтем ожидаемую погрешность для водорода ($A_1 = 2$) и воздуха ($A_1 = 28{,}8$) для объемов в 5—20 литров.

Давления метры	Объемы литры	Водород $A_1 = 2$			Воздух $A_1 = 28{,}8$		
		$V=5$	$V=10$	$V=20$	$V=5$	$V=10$	$V=20$
$P=0{,}5$		$y_1=47$	24	13	$y_1=4$	3	2
$P=1$		$y_1=24$	13	7	$y_1=3$	2	2
$P=2$		$y_1=13$	7	4	$y_1=2$	2	1
$P=3$		$y_1=9$	5	3	$y_1=2$	1	1
$P=4$		$y_1=7$	4	3	$y_1=2$	1	1
$P=5$		$y_1=6$	3	2	$y_1=1$	1	1

Действительные погрешности могут быть только тогда более вычисленной по VI возможной погрешности, когда некоторые обстоятельства (сгущение на поверхности, чистота газа и т. п.), нами не принятые

при расчете во внимание, в действительности оказывают ощутимое влияние на определяемую плотность газов. Тогда надо будет изучить эти обстоятельства и освободить новою поправкою результат от их влияния.

Затем должно ждать погрешностей менее вычисленных выше, потому что мы приняли влияние всех погрешностей в одну сторону, а выражение VI показывает, что y_1 состоит из 6-ти слагаемых, из коих одни могут быть с +, другие с —, а мы их все приняли положительными. Однако вышевычисленные погрешности во всяком случае *возможны* и они дают средство знать *все* наблюдений при известных обстоятельствах. Так, например, если для водорода сделано будет два определения: одно при $V = 5$ и $P = 2$, а другое при $V = 20$ и при $P = 2$, то второе должно счесть по достоинству в 3 раза лучше первого. Этой оценки нельзя было бы узнать, не сделав разбора всех обстоятельств, влияющих на точность определения Y_1. Для ближайшей цели наших исследований, то есть для определения отступлений от Бойль-Мариоттова закона, вышеизложенное рассмотрение имеет, кроме того, другое более важное значение, которое видно из следующего частного примера. По данным Реньо следует, что при переходе от давления в 1 метр к 2-м, значение Y_1 для воздуха меняется на 26, а потому, если бы мы взяли 5-ти литровый шар и сделали все определения с той степенью точности, какая выше принята, то погрешность при $P = 1$ могла быть ± 3, а при $P = 2$, она могла бы быть ± 2, а потому при сравнении двух полученных Y, имели бы возможность ожидать погрешность ± 5, а вся разность $= 26$. Конечно, в отдельных наблюдениях, особенно в среднем из нескольких определений, проявилось бы *качество* отступления, но о количественной его стороне нельзя было бы говорить с уверенностью, ибо погрешность $= 20\%$ отступления. Если бы сличение было сделано в сосуде с емкостью в 20 литров, при $P_1 = 1$ и $P_2 = 4$, то ожидаемая погрешность $= \pm 3$, а отступление тогда $= 71$ (погрешность $= 4\%$), поэтому тогда можно было бы открыть не только то, в какую сторону происходят отступления, но даже и определить их меру с вероятностью, возрастающею по мере увеличения числа наблюдений. Из этого ясно, что *при близких давлениях нет пользы делать определения* Y, если при этом оно меняется незначительно, как это замечается близ обыкновенного давления, ибо необходимо для точности результата, чтобы возможные погрешности были гораздо меньше отыскиваемых отступлений.[1]

Переходя от общей формулы VI к частной VII, мы рассмотрели тот случай, когда объем велик и (vm) велико, а P_1 мало; теперь разочтем погрешности при другом случае, а именно при значительных (от 1 до 60 метров) давлениях, а V примем за 1,5 литра (приблизительно

[1] Необходимо однако заметить, что при сравнении двух определений Y_1 и Y_2 некоторые погрешности исчезнут, ибо будут в обоих определениях с одним знаком, так как зависят от одного предварительного определения, например, член с (vm). Далее мы рассмотрим подробнее погрешность относительных определений, а потому теперь на них более и не останавливаемся. Главная погрешность происходит от p и почти пропорциональна массе газа.

объем нашего стального сосуда, § 14) и тогда примем $(vm) = 0{,}000001$, ибо тогда можно взвешивать сосуд на весах значительно бóльшей чувствительности. Тогда VI уравнение даст:

$$y_1 = \frac{155}{P_1 A_i} + 1{,}07. \qquad \text{VIII}$$

Откуда находим значения y_1

	$P=1$	$P=10$	$P=20$	$P=30$	$P=40$	$P=50$	$P=60$
Для воздуха	$y_1=6{,}5$	1,6	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
» водорода	$y_1=78{,}6$	8,8	4,9	3,6	3,0	2,6	2,4

Если даже допустить, что чувствительность весов (m_0) будет только 1 миллиграмм, то и тогда для воздуха при $P = 10$ получим $y_1 = 3{,}8$, при $P = 50$, $y_1 = 1{,}6$, а потому можно надеяться достичь желаемой степени точности, бóльшей, чем была у Реньо. Для определения погрешности его наблюдений, служащих для нахождения Y_1 (§ 21) достаточно указать на то, что у него $T = 0$, V_1 было приблизительно $=$ $= 10$ литрам, а $p_1 = 0{,}0001$, при $P_1 = 0{,}76$, чувствительность весов $m_0 = 1$, а $v_1 =$ не менее как 0,00001. Полагая $t = 0$, $n_0 = 0$, $t_1 =$ $= 0{,}1$, найдем, что погрешность при $P = 0{,}76$ для водорода $= 74$, для воздуха $= 7$. Так как разность y_1 для воздуха и водорода, по данным Реньо $= 16\,098 - 16\,079 = 19$, то в настоящее время еще и нельзя утверждать, что величины Y_1 для разных газов не вполне одинаковы. Требуются и здесь новые опыты.

§ 24

В предшествующих параграфах мы рассмотрели способ абсолютного определения Y_1, дающий при постоянном составе газа и температуре наилучшую возможность узнать применимость Бойль-Мариоттова закона, качество и количество отступлений от него. Способ этот мы называем *весовым*. Но есть другой *объемный* способ, которым сделаны почти все произведенные до сих пор определения. Этот способ проще, короче, а иногда даже и точнее весового, а потому обратимся теперь к его рассмотрению. Это необходимо особенно потому, что при очень малых давлениях весовой способ совершенно неприменим по незначительности веса разреженного газа. В объемном способе можно различить два главных видоизменения: А) объемы заранее измерены при помощи делений, нанесенных на трубке, содержащей газ (таков обычный способ, от Мариотта до Реньо) и В) объемы газа измеряются каждый раз по весу вытекшей ртути. Так как в обоих способах объемы измеряются по весу ртути, но в первом требуется каждый раз отчитывание, которого не нужно во втором способе, сверх того, так как при первом (А) способе нельзя взять сколько-либо значительный объем газа [1] и так как второй (В) способ я предполагаю преимущественно применить к определению сжимаемости газов под малыми давлениями,

[1] Так у Реньо наибольший объем не более 160 кубических сантиметров.

то мы здесь и будем рассматривать этот второй (B) способ, а о первом способе скажем только несколько слов в конце, тем более, что его можно рассматривать как частный случай второго общего способа. По второму способу должно ждать меньшей погрешности, чем по первому способу, отчего я и предлагаю этот последний.

Дабы придать результатам объемного способа значение абсолютное, необходимо изойти из объема газа V_0, смеренного при давлении P_0, при коем Y_0 известно по весовому способу. Тогда по объемному способу найдется отношение Y_1, полученного при P_1, к Y_0, а следовательно и абсолютное значение Y_1. При этом должно быть соблюдено необходимое условие, чтобы масса M (и по возможности температура T) газа в объеме V_0 при P_0 была та же, что и в V_1 при P_1. Весовой способ есть способ переменных масс (а иногда он в то же время есть способ почти постоянных объемов), а объемный есть способ постоянных масс. Главное условие его практической выгодности состоит именно в том, что здесь избегается взвешивание, но хотя это и упрощает наблюдение, однако вводится новая погрешность от определения переменного объема. Итак, пусть при P_0 дано Y_0 с точностью y_0 и объем V_0 с точностью v_0, а в давлении P_0 назовем погрешность p_0. Очевидно, что:

$$Y_0 = \frac{M_0 (C_0 + T_0)}{V_0 P_0 A_1}, \tag{a}$$

$$Y_0 \pm y_0 = \frac{M_0 (C_0 + T_0 \pm t)}{(V_0 \pm v_0)(P_0 \pm p_0) A_1}. \tag{b}$$

Точно так же имеем:

$$Y_1 = \frac{M_0 (C_0 + T_0)}{V_1 P_1 A_1}, \tag{c}$$

$$Y_1 \pm y_1 = \frac{M_0 (C_0 + T_0 \pm t)}{(V_1 \pm v_1)(P_1 \pm p_1) A_1}, \tag{d}$$

где t есть неизбежная погрешность температуры.

Из (a) и (c) очевидно, что:

$$\frac{Y_1}{Y_0} = \frac{V_0 P_0}{V_1 P_1} = 1 + X_1,$$

где $X_1 = \frac{Y_1 - Y_0}{Y_0} = \frac{V_0 P_0}{V_1 P_1} - 1$ и есть искомая (малая) величина,[1] погрешность коей назовем чрез x_1.

$$X_1 + x_1 = \frac{Y_1 + y_1 - Y_0 + y_0}{Y_0 - y_0}.$$

Отсюда

$$x_1 = \frac{y_0 + y_1}{Y_0}.$$

[1] Эту самую величину определял Реньо в своих исследованиях.

Так как, судя по VI ($m_0 = 0$):

$$y_1 = Y_1\left[\left(\frac{1}{C_0+T} + k_2 - k_1\right)t + \frac{(vm)_1}{V_1} + 0{,}00018\,t_1 + \frac{p_1}{P_1}\right],$$

то

$$x_1 = 2\left(\frac{1}{C_0+T} + k_2 - k_1\right)t + 0{,}00036\,t_1 + \frac{(vm)_0}{V_0} + \frac{(vm)_1}{V_1} + \frac{p_0}{P_0} + \frac{p_1}{P_1} \qquad \text{IX}$$

а так как $Y_1 = Y_0(1 + X_1)$ и притом X_0 величина незначительная, то

$$y_1 = y_0 + x_1 Y_0 \qquad \text{X}$$

Из этого следует, что абсолютная погрешность в определении Y_1 будет по объемному способу превышать погрешность весового способа, ибо по объемному способу в погрешность искомого Y_1 входит еще и равная, или близкая к ней погрешность в Y_0 при исходном определении, то-есть при V_0 и P_0. Если принять, что погрешности в Y по весовому способу равны между собою, что не далеко от истины, то по объемному способу получится *тройная погрешност* , противу отдельно произведенного весового определения.[1] Следовательно только там и должно применять объемный способ, где весовой даст еще бо́льшую погрешность. Так мы видели (стр. 50[=305]), что весовым способом Y для водорода при $P = 0{,}5$ определяется с точностью 24 (если $V = 10$), а при $P = 5$ с точностью 3, следовательно, если возьмем $P_0 = 5$ и если сделаем, исходя из него, объемным способом определение при $P_1 = 0{,}5$, то можем иметь погрешность только равную 9, которая все же меньше погрешности (24) прямого весового способа. Здесь $y_0 = 3$, а потому y_1 можно принять за $3y_0 = 9$. Если бы можно было в практике иметь большие легкие сосуды, сохраняющие или мало меняющие свой объем при изменении давления, то объемный способ был бы во всяком случае хуже весового.

Определив значение объемного способа, посмотрим теперь на результаты, которые он может доставить при малых давлениях, принимая во внимание практическую выполнимость предполагаемых приемов. Для этого должно определить значения букв, входящих в IX.

$C_0 + T$ опять положим $= 290$; k_2, при определении объемов весом ртути, есть коэффициент расширения ртути, следовательно $k_2 - k_1 = 0{,}00016$; t опять можно принять $= 0{,}005$, а $t_1 = 0{,}1$. Что касается до P_0, то его для всех газов примем $= 1$ метру, ибо при этом давлении Y_0 можно определять уже очень точно. Тогда для измерения давлений должно будет, конечно, пользоваться барометром (§ 10), имеющим высоту, бо́льшую метра. По допущению, принятому выше,

[1] Это можно видеть еще из следующего соображения. Пусть дано Y_0 при P_0 с точностью y; необходимо взять при этом давлении некоторый объем V_0 и при этом получится опять погрешность y, да затем она же получится при новых P_1 и V_1, а следовательно в Y_1 тогда будет погрешность $3y$, считая, что каждое определение объема и давления даст одинаковую погрешность y в результате.

$p_0 = 0{,}00002$. Что касается до p_1, то примем его от $P = 1$ до $P = 0{,}01$ метра также за 0,00002, а затем, от $P = 0{,}01$ до $P = 0{,}001$, за 0,000005, ибо тогда определение давлений можно производить с помощью проверенного микрометра при окуляре трубы, тогда не будет входить погрешности от совокупности двух труб катетометра или от передвижения одной трубы. Что касается до $\frac{(vm)_0}{V_0}$ и $\frac{(vm)_1}{V_1}$, то их можно прямо принять равными, потому что на весах, известной точности и нагрузки, можно взвешивать только определенный груз, а потому если V_1 будет гораздо больше V_0, то взвешивание ртути придется повторить столько раз, во сколько V_1 больше V_0. Следовательно, все зависит от исходного объема V_0. Его нельзя сделать очень малым, потому что объем этот слагается из двух величин: одной постоянной w_0, заранее определяемой, и другой произвольно изменяемой W_0. Величиною w_0 мы означаем объем газа в манометрической трубке, вне ванны с водою, в которой находится остальной газ. А как манометрическая трубка для избежания капиллярной поправки должна быть диаметром около 20 миллиметров и так как, при всех приспособлениях, необходимых для уравнения высот мениска (см. § 10 главы о барометрах и малых давлениях), все-таки он меняется от 1,4 на 0,1 миллиметра и чрез это в объеме делается погрешность (находимая по способу, указанному на странице (47[=300])=0,000015 л. или 0,2 грамма ртути, то такую же погрешность можем всегда ждать и в V_0 от определения w_0. Величина W_0 найдется по весу вылитой (от определенной в узкой трубке черты) ртути. Если вес W вылитой ртути будет мал, то погрешность $\frac{(vm)_0}{V_0}$ будет велика, а потому надо сделать все [1] V_0 (или $w_0 + W_0$) значительным. Если принять сумму погрешностей в w_0 и W_0 за 0,00002, а V_0 за 0,1 литра (= 1350 граммам ртути по весу), тогда $\frac{(vm)_0}{V_0} = 0{,}0002$, если же V_0 будет = 1 (то-есть около 13 килограммов ртути), то $\frac{(vm)_0}{V_0} = 0{,}00002$. Относительную погрешность, происходящую от взвешивания ртути, сохранить легко при бóльшем объеме V_1, а потому следует принять $(vm)_0 = 0{,}000015 + m_0$, где m_0 есть чувствительность весов в килограммах, деленная на плотность ртути. $(vm)_1$ будет $= 0{,}000015 + m_0 \frac{V_1}{V_0}$, если навеска ртути будет каждый раз такая же, как и при определении V_0. Что касается до m_0, то сравнительно грубые весы, при больших грузах, показывают легко 0,000005, например, 5 сантиграммов при 10 килограммах веса, а потому, если выразим и (vm), и V в граммах ртути, то получим $\frac{(vm)_0}{V_0} = \frac{0{,}2}{V_0} + 0{,}000005$, где V_0 выражено в граммах ртути. Точно так же получим $\frac{(vm)_1}{V_1} = \frac{0{,}2}{V_1} + 0{,}000005$, опять выразив V_1 в граммах ртути. Ясно, что V_0 и V_1 должны быть велики, чтобы погрешность была мала, но сделавши V_0 при $P_0 = 1$ очень большим, должно будет при

[1] [Все = всё. *Прим. ред.*]

малом P_1 сделать V_1 чересчур громадным, что практически не выполнимо, а потому V_1 надо признать за наибольший из определяемых объемов, если хотим сделать погрешность наименьшею. В сосудах, употребленных мною, вмещается от 40000 до 50000 граммов ртути, а потому примем $V_1 = 40000$ граммов ртути, тогда $\frac{(vm)_1}{V_1} = 0{,}00001$, а $\frac{(vm)_0}{V_0} = 0{,}000005\left(\frac{1}{P_1} + 1\right)$, потому что V_0, судя по изложенным условиям, $= 40000 P_1$, ибо $V_0 : V_1$ почти $= P_1 : P_0$, а мы приняли $P_0 = 1$, $V_1 = 40000$. Вставляя в IX указанные значения букв, получаем:

$$x_1 = 0{,}000107 + \frac{0{,}000025}{P_1} \text{ для } P_1 \text{ от 1 до 0,01 метра} \qquad \text{XI}$$

$$x_1 = 0{,}000107 + \frac{0{,}000010}{P_1} \text{ для } P_1 \text{ от 0,01 до 0,001 метра} \qquad \text{XII}$$

Отсюда вычисляем, что погрешность в определении X_1 или $\frac{V_0 P_0}{V_1 P_1} - 1$ будет следующая (в десятитысячных долях)

	по XI					по XII		
(метры)	$P_1 = 0{,}75$	0,5	0,1	0,05	0,02	0,01	0,005	0,001
10000	$x_1 = 1{,}4$	1,6	3,6	6,1	13,6	11,1	21,1	101,1

Если принять при $P_0 = 1$ погрешность $y_0 = 5$, то-есть среднюю погрешность, возможную при $P_0 = 1$ и $V = 20$, для водорода и воздуха (стр. 50 [= 303]), то по x_1 получим:

$P_1 =$	0,75	0,5	0,1	0,05	0,02	0,01	0,005	0,001
$y_1 =$	7	8	11	15	27	35	39	167 [1]

Заменяя в объемном способе трубки с делениями сосудами бóльшего объема, я надеюсь достичь гораздо бóльшей точности, чем было до сих пор, а для доказательства разочту, как велика погрешность в определении V_1, если применить способ Реньо, предполагая, что ртуть взвешивается с точностью 0,001 грамма. Следовательно $(vm)_0 = (vm)_1 = 0{,}001$, если V_0 и V_1 выражены (как действительно и делал Реньо) в граммах ртути. Кроме этой погрешности, свойственной первоначальному определению емкости, в каждом наблюдении объемов здесь имеем две других погрешности: 1) погрешность отчета, которую в опытах, подобно Реньо, должно принять гораздо больше 0,02 мм., что дает, при диаметре трубки = 1 сантиметру, погрешность $\pm$ 0,02 грамма ртути; 2) погрешность в разности высот мениска, о чем шла речь на стр. 47 [=298]. Там мы видели, что она, при диаметре трубки=1 сантиметру (таковы трубки Реньо), может достигать 0,036 куб. сант. или 0,489

[1] При малых давлениях можно погрешность уменьшить, не только применяя манометры с жидкостями, более легкими, чем ртуть, но еще и разделяя определения X_1 на два раза. Так, например, переходя от $P_0 = 1$ к $P_1 = 0{,}05$, определим Y_1 с погрешностью = 15. Если теперь P_0 сделаем $= 0{,}15$, а $P_1 = 0{,}001$, то x_1 будет= $= 0{,}0051$, а потому $y_1 = 96$, то-есть погрешность значительно уменьшится.

грамма ртути. Поэтому вся погрешность $(vm)_0 = (vm)_1 = 0{,}001 + 0{,}020 + 0{,}489 = 0{,}51$ граммов ртути. В опытах Реньо наибольший объем V_0 заключал около 1980 гр. ртути, меньший — половину или треть. Мы примем $V_0 = 2000$, $V_1 = 1000$. Бо́льший объем было бы неудобно взять по длине получающейся тогда трубки. Погрешность в давлениях, даже малых, нельзя принять меньше того, что признает Реньо для барометра, а именно 0,1 мм. Если же мы примем во внимание, что при возрастающей высоте вкрадывались у Реньо (§ 1) и другие погрешности, то имеем полное право принять, что для его опытов $\frac{p_i}{P_i} = 0{,}0001$. В опытах Реньо t (погрешность температуры газа) не менее 0,01°, ибо тысячные доли градуса даже и не отчитывались, а t_1 (погрешность температуры ртути) была не менее 0,2. Подставляя эти величины (меньшие возможных), получим для опытов Реньо (вывод как и IX):

$$x_1 = 2\left(\frac{1}{280} + 0{,}00016\right)t + 2 \cdot 0{,}00018\, t_1 + 0{,}51\left(\frac{1}{V_0} + \frac{1}{V_1}\right) + \\ + \frac{p_0}{P_1} + \frac{p_1}{P_1} = 0{,}0011.$$

Этот расчет подтверждается сличением отдельных определений Реньо, например, тем, который приведен в § 1 стр. 2 [=236]. Приняв погрешность в y_0 при $P_0 = 1$ метру равною 5, как это сделано в предшествующем расчете, мы получим следующую погрешность для опытов Реньо, предполагая, что каждый раз объем меняется только от 2000 на 1000 граммов ртути (что и составляет особенность приема Реньо):

Давление в метрах	0,007	0,015	0,031	0,062	0,125	0,25	0,5	2	4	8	16
Погрешность в Y по способу Реньо	128	111	93	75	58	40	23	23	40	58	75
Погрешность y, [1] ожидаемая мною:	37	31	23	14	10	9	8	5	3	6	4
	По объемному способу							По весовому способу			

В общем выводе замечается, что по проектированным мною приемам погрешность уменьшается по мере увеличения давления, а по способу Реньо она возрастает при уменьшении и при увеличении давления. Это потому, что главная причина погрешностей по способу Реньо, как это видит и он сам, зависит от погрешностей объема. Объемы у него малы. Главная же погрешность по существу дела должна происходить от давлений. Точность в определении давлений преимущественно должна определять точность результата, то-есть Y_1.

По этой то причине в дальнейшем изложении читатель увидит, что главное внимание наше было посвящено определению давлений.

[1] Взято среднее для водорода и воздуха.

§ 25

Так как соображения, высказанные в предшествующих параграфах, положены мною в основание излагаемых затем приемов исследования, и так как от этих соображений зависят особенности предпринимаемых опытов и способ выражения их результатов, то я считаю полезным сделать перечисление главных выводов предшествующего изложения.

a) Вопрос о сжимаемости постоянных газов приобретает общность и результаты наблюдений — абсолютное значение тогда, когда наблюдения выразятся в форме:

$$Y = \frac{M(C+T)}{VPA};$$ [1]

где M есть вес, T — температура наблюдения, V — объем, P — давление, A — частичный вес, C принимается за 273, хотя впоследствии и станет определяться изменение C с давлением. Y есть величина, которая по законам Бойль-Мариотта и Гей-Люссака постоянна, а в действительности есть переменная, зависящая от природы газа, от T и P. При постоянной T и при той же природе газа значения Y выражают сжимаемость газа в абсолютной мере.

b) Для определения Y_i при разных P_i известны два способа: весовой и объемный. Последни способ требует знания Y_0 при P_0, а поэтому к нему необходимо прибегать только там, где, как при малых давлениях, весовой способ не может дать точных результатов вследствие практических затруднений.

c) Неизбежную погрешность в Y необходимо сделать зависящею преимущественно от погрешности в P, для чего должно, по возможности, увеличивать массу газа и соблюдать постоянство температуры T, а потому приличнее всего избрать для опытов обыкновенную комнатную температуру, например, 17°,5.

d) Особенное внимание должно обратить на уменьшение погрешности в P, а потому необходимо применить способ компарирования с нормальною мерою, устранить влияние переменного атмосферного давления, соблюдать возможное равенство менисков ртути в манометрических ветвях и определять температуру ртути в манометре с возможною точностью.

e) Для сосудов, содержащих газ, необходимо определить изменение их емкости при изменении внутреннего давления, дабы погрешность в Y не возросла от упущения этой поправки.

f) Наибольшая возможная погрешность весового способа, при соблюдении необходимых поправок, определяется по VI и такая же погрешность объемного способа по IX и X. Определение возможной погрешности дает не только вес отдельному наблюдению, но и опору в выборе способов наблюдения.

---

[1] Так как $\frac{M}{V}$ есть удельный вес D (= весу литра при P и T в миллиграммах), то однородность получается, выразив $Y = \frac{D(C_0 + T_i)}{PA}$.

g) Так как возможная погрешность при малых давлениях больше, чем при больших, то при малых давлениях полезнее произвести большее число наблюдений, чем при больших давлениях.

h) Принимая во внимание возможную погрешность наблюдений, полезнее для точности в определении изменения Y сделать повторенные наблюдения при значительно различных давлениях, чем такое же число наблюдений при давлениях, недалеко отстоящих друг от друга.

i) Определения сжимаемости необходимо дополнить определениями коэффициентов расширения газов при разных давлениях, потому что, заменив C_0, принятое постоянным, соответственными давлениям переменными величинами C_i, можно будет узнать, на сколько применима совокупность Гей-Люссакова и Мариоттова законов к постоянным газам. Только тогда можно будет сделать суждение о степени согласия гипотезы о совершенных газах с действительностью, ибо газы могут не следовать ни Мариоттову, ни Гей-Люссакову законам в отдельности, но могут удовлетворять их совокупности. Общий закон упругости газов может быть найден только тогда, когда будут известны изменения Y с переменою природы газа, давления и температуры.

k) Вводя в выражение для определения сжимаемости газов величину веса химической частицы, мы можем надеяться отыскать зависимость между нею и Y.[1]

l) Когда сличение повторенных, при данном P, наблюдений со средним из них результатом даст [2] вероятную погрешность среднего числа и когда найденная этим путем погрешность будет меньше возможной, рассмотрению которой посвящена текущая глава, тогда можно будет в пределах погрешностей положиться на средний результат наблюдений. Если же вероятная погрешность (например, выведенная при данном P и переменной V) окажется больше возможной, тогда будет

---

[1] Зависимость между Y и весом частицы (а также вероятно и числом атомов) можно ждать не только потому, что от веса частиц зависят все свойства тел, но и потому, что ныне уже известные данные для многих газов указывают на существование такой зависимости, хотя и не дают права утверждать ее с положительностью.

[2] По известному правилу теории вероятности. Пусть сделано n наблюдений, дающих n различных Y, вероятность коих одна и та же (а если она неодинакова, то должно, как известно, помножить данное на вес наблюдения или взять m раз то наблюдение, коего вес $= \frac{1}{m}$, если другие наблюдения, коих вес $= 1$, взяты 1 раз). Получим среднее Y_1 и вычтем из него всякое данное Y. Получится n разностей, которые назовем z. Сумму квадратов этих величин означим: $\sum (z^2)$. Вероятная погрешность среднего результата Y_1 будет, по правилу теории вероятностей, $= \pm 0{,}675 \sqrt{\frac{\sum (z^2)}{n(n-1)}}$, то-есть истинное значение лежит между $Y_1 + 0{,}675 \sqrt{\frac{\sum (z^2)}{n(n-1)}}$ и $Y_1 - 0{,}675 \sqrt{\frac{\sum (z^2)}{n(n-1)}}$. Приближенно вероятная погрешность $= \frac{1{,}196}{\sqrt{2n - 0{,}86}} \frac{\sum z}{n}$.

необходимо исследовать все обстоятельства опытов и разыскать между ними те (например, сгущение на поверхности, растворимость газов в ртути, разложение сложных газов при уменьшении давления и т. п.), которые не приняты во внимание при расчете возможной погрешности. Идя этим путем, можно надеяться достигнуть полной уверенности в том, что все обстоятельства приняты во внимание при изучении явления сжимаемости.

§ 26

В заключение этой главы рассмотрим существующие ныне данные для расширения ртути и воды и для веса воздуха, потому что нам придется очень часто пользоваться этими величинами.

В исследовании над упругостью газов постоянно придется производить определения высот ртутных столбов при некоторой температуре, а потом приводить их для возможности точного сличения к температуре 0° или к какой-либо другой, а для этого должно пользоваться наблюдениями над расширением ртути от нагревания. Такие числа даны Реньо в 1 томе его Relation des expériences etc., p. 328. Они вычислены по эмпирической формуле:

$$V_t = 1 + 0{,}000179007\,t + 0{,}00000002523\,t^2 \qquad R$$

$$\lg = 0{,}2528690 - 4 \quad \lg = 0{,}4019441 - 8.$$

Для вывода этой формулы Реньо взял только два данных из множества своих наблюдений. Босша, разбирая [1] отчет Реньо об этом предмете, воспользовался всеми наблюдениями Реньо и выражает на основании всей совокупности его данных расширение ртути формулою:

$$V_t = V_0 e^{at}, \qquad B$$

где e есть основание неперовых логарифмов и a — единственное число, выражающее расширение ртути от нагревания. Босша, приняв вес данных пропорциональным температуре, вывел из всех опытов Реньо, что среднее $a = 0{,}00018077$. Численные выводы Реньо и Босша значительно разнятся между собою, как видно из сравнения, в котором принят объем ртути при 0° за 1 000 000.[2]

Объем ртути		при 50°	100°	200°	300°	350°
По опытам Реньо		—	1018197	1036824	1055931	—
По формуле	R	1009013	1018153	1036811	1055973	1065743
»	B	1009079	1018241	1036816	1055729	1065314
»	M	1009041	1018194	1036836	1055924	1065636

[1] Статья Bosscha, jun., помещенная в Archives Néerlandais, т. IV, известна мне по Poggendorff's Annalen, Ergänzungsband V (1870) — 276.

[2] Высоты столбов ртути у Реньо были около 1500 мм., а точность отчета 0,02 миллиметра, следовательно по этой одной причине погрешность должно считать не менее 0,00001; следовательно далее миллионных долей не должно итти при сличении, потому что погрешность уже по этой одной причине = 14 (миллионных).

До 200° числа по формуле R менее, чем по формуле B, и эти последние ближе к действительным результатам наблюдения. Но для температур выше 200° числа B ниже, чем R, и ниже результатов наблюдения. Пользуясь результатами наблюдений Реньо и поправками, введенными Босша, я вывел [1] следующую формулу, выражающую расширение ртути с точностью бо́льшею, чем по формулам R и B:

$$V_t = 1\,000\,000 + 179{,}71\,t + 0{,}02235\,t^{2}\ ^{2} \qquad M$$
$$\lg = 2{,}25457 \qquad \lg = 0{,}34928 - 2.$$

Эта формула имеет то преимущество пред формулою R, что дает для температур 0—100° числа, очень близкие к наблюденным, тогда как R дает числа *всегда* меньше наблюденных. Так, например, для температуры 75° из всех *шести* (близких по температуре) наблюдений Реньо, пользуясь способом расчета Босша, получаем объем = 1 013 630. Это есть результат опыта. Формула R дает 1 013 568, а M дает число 1 013 604. Формула M сравнительно с формулою B представляет то преимущество, что лучше выражает расширение ртути при высоких температурах, особенно выше 240°, а при температурах около 100° формула B дает числа больше наблюденных. Притом формула B неудобна для расчета и имеет такой вид, что не приложима к другим жидким и твердым телам. Увеличив число коэффициентов в показателе, как делает это Босша при расчете расширения стекла, получим формулу, еще более трудную для расчета сравнительно с обыкновенною

[1] Взяв эти таблицы результатов наблюдений, разочтенных Босша (полнее и точнее, чем у Реньо), все данные для температур, близких к 100°, получаем, что среднее $\alpha = 0{,}0018033$, при 200° оно = 0,001801, при 300° = 0,0018141, откуда объем при 100° = 1018197, при 200° он = 1036824, при 300° объем = 1055931. Эти числа и послужили мне для расчета, который был произведен по способу наименьших квадратов. Отступления наблюдений от формулы при двух коэффициентах не превышают возможной погрешности наблюдений, а потому в более сложной формуле нет необходимости.

[2] Для вывода формулы M служили данные Реньо, исправленные тем способом, какой употребил Босша. Если этой последней поправки не делать, а взять прямо данные Реньо, приведенные в его мемуаре, рассчитывая сперва отдельно каждый ряд наблюдений, а потом взяв из них средние, которые суть (считая $V_0 = 1\,000\,000$) для 75° $\frac{V_t - V_0}{\quad}$ 181,36, для 100° = 181,83, для 150° = 183,02, для 200° = 184,03, для 280° = 185,96, то получается формула:

$$V_t = 1\,000\,000 + 179{,}75\,t + 0{,}0217\,t^2,$$

которая дает до 150° почти тождественные значения с M, например, при 100° по ней $V_t = 1018192$, а по $M = 1018194$. Формула, данная Гольтеном (Commission internationale du mètre. Reunion des membres français. 1873—1874, p. 69): $V_t = 1\,000\,000 + 180{,}5832\,t + 0{,}0089003\,t^2 + 0{,}000032848\,t^3$ не только сложнее других, но и мало удовлетворяет действительности, хотя выведена из тех же данных Реньо. Так по данным Реньо при 200° объем = 1 036 806 (а по исправлении, как у Босша, 1 036 824), а формула Гольтена дает число 1 036 739. Весьма значительные разности вывода Гольтена от выводов Реньо, Босша и моих для температур ниже 100° зависят от того, что Гольтен придавал одинаковый вес данным для низких и высоких температур, тогда как наблюдений до 100° и мало, и они заключают несомненно относительно большую погрешность. При моих расчетах я принял, как и Босша, вес наблюдений пропорциональным температуре.

параболическою формулою. Вопрос же о коэффициенте расширения ртути имеет такую практическую важность при производстве многих точных наблюдений, что его решение и выражение с возможным совершенством и простотою весьма желательны. Формула M имеет простой вид, как и формула R, а совокупности наблюдений Реньо отвечает лучше, чем формулы R и B, поэтому во всех дальнейших исследованиях я принимаю расширение ртути по формуле M. Для доказательства той важности, какую имеют числа, выражающие расширение ртути, беру два примера. Если при 20° наблюдена высота ртутного столба 60 000,00 миллиметров (это есть наибольшая высота при одном из моих манометров, она отвечает около 80 атмосферам), то при 0° высота столба ртути была бы разочтена по $R = 59\,785{,}37$, по $B = 59\,783{,}48$, по $M = 59\,784{,}60$, а следовательно, применяя ту или другую формулу, мы можем иметь при 60 метрах давления разность, достигающую до величины легко измеримой 1,89 миллиметра. Еще бщутительнее влияние принятого выражения для расширения ртути по отношению к определению коэффициентов расширения других тел. Пусть взят для определения расширения воды сосуд, вмещающий при 0° 100,0000 граммов воды; пусть *кажущееся* расширение воды, выраженное весом воды, вмещающейся в сосуд, при 100° = 95,6330. Для определения истинного расширения воды, пусть будет сделано наблюдение в том же сосуде с ртутью и результат его выражен в кажущихся объемах ртути: объем при 0° — 1 000 000, при 100° = 1 015 700. Если сделаем расчет по формуле R, то объем воды при 100° = 1 042 905, если при 0° = 1 000 000. Если сделаем расчет по формуле B, то объем при 100° = 1 042 855; по формуле M объем воды при 100° = 1 042 863;[1] разность двух первых чисел $= \frac{1}{20\,000}$, следовательно превышает погрешность обыкновенных весов. Из этого видно, что те числа, которые дают Депре, Копп, Пьер, Розетти и др., представляют разность в расширении воды, между прочим значительно зависящую от того, какими коэффициентами расширения ртути они пользовались.

Для облегчения расчетов, в которые входит коэффициент расширения ртути, прилагаем таблицу, составленную на основании формулы M. В ней кроме объемов и коэффициентов расширения даны удельные веса ртути, считая, как следует по наблюдениям Реньо и Неймана, уд. вес ртути при 0° за 13,59593 ± 0,00020 (вода 4° = 1).

В следующей за сим таблице в первом столбце даны T — температуры по стоградусному воздушному термометру; во втором V_t объемы при T по формуле M, принимая объем *при* 0° *за миллион* [вероятная погрешность от ± 7 до ± 20 (?)]; в третьем коэффициенты расширения ртути на 1° при T°, считая при *этой температуре* объем *за миллион*; в четвертом — логарифмы объемов; в пятом — разности логарифмов в семь цифр (даны без нулей), отвечающие изменению температуры

[1] Рассчитывая средний коэффициент кубического расширения сосуда от 0° до 100° по R, получим, что он = 0,00002415, по B = 0,00002462, по M = 0,002455.

на 1° Ц.,[1] то-есть от T до $T + 1°$; в шестом — логарифм удельного веса ртути при T по отношению к весу равного объема воды при 4°;[2] в 7-м — температуры, определенные по *истинному* расширению ртути; в 8-м — разность между этими температурами, определенными по M, и такими же, определенными по формуле R.[3]

Расширение ртути от 0 *до* 350°

T	V_t	$\frac{d(V_t)\,V_0}{d(t)\,V_t}$	$\lg V_t$	$\frac{d(\lg V_t)}{d(t)}$	$\lg D_t$	$t_m = 100\frac{V_t - V_0}{V_{100} - V_0}$	$t_M - t_R$
0	1 000 000	179,71	6,000 0000	780,4	1,1334090	0,000	
10	1 001 799	179,84	6,000 7806	781,0	1,1326284	9°,888	+ 0,016
20	1 003 603	179,96	6,001 5619	781,5	1,1318470	19°,803	+ 0,027
30	1 005 411	180,08	6,002 3436	782,1	1,1310653	29°,741	+ 0,032
40	1 007 224	180,20	6,003 1261	782,6	1,1302829	39°,706	+ 0,038
50	1 009 041	180,31	6,003 9088	783,1	1,1295002	49°,693	+ 0,043
100	1 018 194	180,89	6,007 8305	785,6	1,1255784	100°,00	0,00
150	1 027 459	181,43	6,011 7645	788,0	1,1216445	150°,92	— 0,12
200	1 036 836	181,95	6,015 7101	790,2	1,1176989	202°,46	— 0,32
250	1 046 324	182,44	6,019 6666	792,3	1,1137424	254°,61	— 0,60
300	1 055 925	182,89	6,023 6331	794,2	1,1097759	307°,39	— 0,95
350	1 065 636	189,31	6,027 6090	796,0	1,1058000	360°,76	— 1,40

Вышеприведенное рассмотрение расширения ртути показывает то значение, какое имеет способ расчета на результат исследования, а практически необходимо было оно потому, что числами этой таблицы я руководствовался во всех своих расчетах. Если окажется при новом ряде опытов или при более строгой оценке данных Реньо, что цифры, принятые мною, не отвечают действительности, то можно мои результаты перечислить по новым, более верным данным. Во всяком случае для температур от 0° до 100° цифры мои ближе к данным опыта, чем те, которые принял сам Реньо. Если бы развитое здесь содействовало ускорению повторения опытов Реньо над расширением ртути, то тогда цель моих замечаний была бы вполне достигнута. Особенно было бы важно для точных работ вновь определить расширение ртути между 0 и 100° с точностью бо́льшею, чем у Реньо.

---

[1] Эти разности были бы совершенно одинаковы, если бы расширение ртути действительно точно выражалось такою показательною функциею, как B. Они однако настолько близки, что в пределе 50° можно, не увеличивая неточности, пользоваться соответственными разностями для определения объемов при температурах, не указанных в таблицах. Так, например, при температуре 13°,485, логарифм объема ртути равен 6,0007806 + 3,485.781,0, то-есть логарифм объема при 10° + разность искомой температуры от 10° (3,485), умноженная на соответственную 10° разность логарифмов. Это даст для 13,485 $\lg V_t = 6{,}0010528$, следовательно $V_t = 1002427$.

[2] Числа 5-го столбца дают легкую возможность определять $\lg D_t$ при температурах, не указанных в таблице.

[3] По этому столбцу видно значение принятия той или другой формулы для расширения ртути и то, как мало надежны расчеты, основанные на температурах, определенных одним ртутным термометром.

§ 27

Если в расширении ртути, которое определено лучше, чем расширение каких-либо других тел, есть необходимость сделать поправку в общераспространенных данных, то это тем более касается до расширения воды и воздуха, а так как в предстоящем исследовании придется постоянно пользоваться данными того и другого рода, то здесь необходимо привести те, которые применялись мною для расчетов. Это особенно необходимо для расширения воды, потому что общеизвестные исследования Депре, Коппа, Плюккера и Гейсслера, Матиссена, Розетти и других заключают в себе такие разноречия, которые оказывают ощутимое влияние даже на сравнительно грубые определения. Здесь неуместно было бы со всею подробностью разбирать данные для расширения воды, но считаю не излишним перечислить те важнейшие причины, из-за которых результаты разных исследователей столь разноречивы: 1) Первая причина состоит в том, что для определения температур исследователи брали не воздушные, а ртутные термометры, а в показаниях их, как известно, разноречие может доходить до $\pm 0{,}07$, если даже калибрование произведено со всем возможным совершенством. 2) Определение коэффициента расширения сосудов производилось или только от 0 до 100°, и тогда была ошибка от принятия равномерного расширения стекла, которого нет в действительности, или же когда определения делались при разных температурах, все-таки сосуд наполнялся ртутью и погружался в ванну с водою; а по наблюдениям такого рода нельзя получить точного коэффициента, потому что от давления ртути, налитой в сосуд, емкость его изменяется.[1] 3) Разные наблюдатели пользовались неодинаковыми данными для расширения ртути. 4) Объемы воды вообще брались недостаточно большие, а потому в дилатометрах (приборах, подобных термометрам) приходилось брать узкую трубку, а в ней капиллярное давление мениска воды при разных температурах и др. обстоятельствах было весьма неодинаково и всегда значительно, в весовом же способе погрешность весов оказывала значительное влияние на погрешность результата при малом весе воды. 5) При взвешивании воды производились поправки на потерю в воздухе с недостаточною степенью точности. К этим причинам, очевидным при знакомстве с описанием произведенных поныне исследований, надо прибавить еще много менее ясных причин: растворение воздуха в воде, неточность калибрования термометров, отсутствие указаний на сличение разновес, произвольность в расчете данных и т. п., которых совокупность заставляет желать нового, по возможности точного исследования над расширением воды, ибо данные этого рода входят во множество измерительных исследований. Пока нет права предпочесть данные одного исследователя пред

[1] Для того, чтобы этого изменения, а следовательно и соответственного ему напряжения не было, необходимо сосуд со ртутью погрузить в ртутную же ванну, если сосуд с водою будет в водяной ванне, дабы давление на стенки в обоих случаях было с обеих сторон равное.

другими,[1] а потому я считал необходимым привести в порядок данные новейшего наблюдателя — Розетти [2] и вот результат, который принят мною в основание всех расчетов для обыкновенных температур, от 0 до 40°.

$$D_t = 100\,000 - (81{,}2 - 0{,}8\,t + 0{,}006\,t^2)\left(\frac{t-4}{10}\right)^2. \qquad M_1$$

Эта формула не уклоняется от данных опытов Розетти более того разноречия, какое встречается в отдельных его определениях, а между тем разнится от вывода самого Розетти, который, повидимому, мало обратил внимания на точность расчета своих наблюдений. Для температур, более высоких, я не старался отыскать соответственную формулу, потому что важнейшее применение данные для расширения воды имеют для температур обыкновенных.

По формуле M_1 составлена прилагаемая таблица. В первом столбце даны температуры, приведенные к показаниям воздушного термометра; во втором даны плотности воды, считая плотность при 4° за 100000 (вероятную погрешность нельзя считать меньшею 2—5), по формуле M_1; в третьем даны логарифмы D_t (в 6 цифр); в четвертом — разности, им отвечающие (для 6 цифр) при изменении температуры от t до $t+1°$; в пятом даны логарифмы объемов, считая объем при 4° за 100000; в шестом — объемы, считая объем воды при 0° за 100000; в седьмом — разность между этими данными и данными Коппа.

Расширение воды от 0° до 35°

t	D_{t_4}	$\lg D_{t_4}$	$\frac{d(\lg D_{t_4})^3}{d(t)}$	$\lg V_{t_4}$	V_{t_0}	$V_{t_0} - V_k$
0	99987	4,999943	+ 30	5,000067	100000	0
5	99999	4,999996	— 6	5,000004	99998	0
10	99973	4,999883	— 37	5,000117	100014	+ 2
15	99915	4,999631	— 65	5,000369	100072	+ 2
16	99899	4,999561	— 70	5,000439	100088	+ 3
17	99883	4,999492	— 74	5,000508	100104	+ 3
18	99865	4,999413	— 78	5,000587	100122	+ 4
19	99847	4,999335	— 85	5,000665	100140	+ 3
20	99826	4,999244	— 89	5,000756	100161	+ 4
25	99714	4,998756	— 108	5,001244	100274	+ 3
30	99577	4,998159	— 128	5,001841	100412	+ 6
35	99418	4,997465	— 144	5,002535	100572	+ 2

[1] Конечно за исключением некоторых частностей. Так должно считать, что данные *Пьера*, особенно для высоких температур, и данные *Коппа* для обыкновенных температур (15—30°) не точны, ибо находятся в большом разноречии с большинством данных других наблюдателей.

[2] Poggendorff's Annalen, Ergänzungsband V—258 (1870).

[3] Цифры этого столбца дают D_t при температурах, не указанных в таблице по интерполированию, например, при 17°,382 плотность воды x найдется так: $\lg x = 4{,}999492 - 75 \cdot 0{,}382 = 4{,}999463$, следовательно $x = 99877$. Число 75, взя-

Считаю неизлишним упомянуть здесь о способе, примененном мною для приблизительного определения коэффициентов расширения сосудов, основанном на знании истинного расширения воды. Если бы в числах для этого расширения была возможная точность, то вода была бы для обыкновенных температур наилучшим средством для определения коэффициента расширения сосудов, потому что коэффициент расширения воды меньше, чем других жидкостей, а это уменьшает погрешность в определении расширения сосудов. Принимая во внимание то, что числа для расширения воды при низких температурах (от 0° до +10°), данные Плюккером и Гейсслером,[1] а затем Вейднером [2] и Розетти, не только близки между собою, но и согласны с формулою M_1, я воспользовался уверенностью в этих числах для определения расширения сосудов. Назовем емкость сосуда при 0° $= V_0$, а искомый коэффициент его расширения k. Наполним сосуд водою до определенной черты при 0° и потом станем медленно нагревать сосуд с водою в ванне с мешалкою. Сперва уровень воды в сосуде станет понижаться, а потом повышаться и когда станет доходить до той черты, при которой стоял при 0°, станем [3] повышать еще медленнее температуру воды; заметим температуру t_1, когда объем будет такой же, как при 0°. Охлаждая затем и замечая при этом t_2, когда вода опять станет на черту, отвечающую 0°, и повторяя опыт несколько раз, взяв среднее, с уверенностью найдем температуру t, отвечающую тому же кажущемуся объему воды, какой она имела при 0°. Эта температура дает коэффициент расширения сосуда, потому что:

$$V_0(1 + kt) : V_0 = D_0 : D_t,$$

$$k = \frac{\frac{D_0}{D_t} - 1}{t}.$$

Величины D_0 и D_t известны из таблицы.[4] Чтобы судить о степени чувствительности этого приема, разочтем, каково будет расширение сосуда, когда

$t = 11°$	$t = 12°$	$t = 13°$	$t = 14°$	$t = 16°$
$\frac{D_0}{D_t} = 100023$	100034	100046	100058	100088
$k = 0{,}0000209$	0,0000283	0,0000354	0,0000414	0,000055

Следовательно, для стеклянных сосудов t будет между 11° и 12°; следовательно, если t определить с точностью до 0,01°, то погрешность в k была бы не более 0,00000007. Для стальных и железных сосудов t

---

тое здесь, есть разность, отвечающая той температуре (около 17,2°), которая лежит в средине между данною (17°) и искомою (17,382°), ибо разность, отвечающая 17° = = 74, а 18° = 78. Применяя цифры 4-го столбца для расчета объемов (5 столбец), должно знаки переменить.

[1] Poggendorff's Annalen (1852) T. 86—238.

[2] Poggendorff's Annalen (1866) № 10.

[3] [В подлиннике «статет». *Прим. ред.*].

[4] В 6-м столбце даны V_{t_0}, которые и равны $\frac{D_0}{D_t}$.

будет, если правильны наши сведения о расширении воды, от 12 до 13, для медных, бронзовых и латунных — от 15 до 16°. Для цинкового сосуда t будет между 20 и 25°. Таким образом, если бы была уверенность в данных для расширения воды, они дали бы легкое и весьма точное средство для определения расширения сосудов. При той степени достоверности, какую имеют ныне данные для расширения воды, все-таки они дают возможность определять коэффициент расширения сосудов с точностью до 0,000002, которая при многих исследованиях достаточна.

§ 28

Отношение весов воздуха и воды (а не вес кубического дециметра воздуха, как обыкновенно говорят, ибо вес этого объема воды с точностью неизвестен, стр. 3 [= 287]) определено Реньо в ряде опытов, которые требуют перечисления, потому что в отчете о них находятся некоторые погрешности.[1] Взвешивание воздуха производилось по способу Реньо, тарируя два равнообъемные шара, прикрепленные к двум чашкам весов. Должно однако считать, судя по отзыву Реньо (стр. 128), что запаянный шар имел несколько бóльший объем, чем шар с краном, потому что, приложив к последнему шару гири для равновесия, Реньо наблюдал в течение нескольких дней, когда температура менялась от 0 до 17° и давление от 741 до 771, что равновесие не нарушалось, несмотря на изменение в плотности воздуха, а это могло происходить только тогда, когда шар с краном + гири занимали тот же объем, как и запаянный шар. К сожалению Реньо не дает, описывая этот опыт, веса приложенных гирь и не указывает, какое давление было оставлено в шаре с краном. Если допустить, что в шаре с краном тогда был заперт воздух под обыкновенным давлением, то, судя по данным, далее приведенным, вес гирь был около 1,5 грамма, следовательно объем их около 0,14 куб. сант. Если же допустить, что взвешивался почти пустой шар, то вес гирь был близок к 14 граммам. Если принять этот вес приложенных гирь, вытекающей из приведенных далее чисел, то из этого должно допустить, что запаянный шар имел внешний объем W шара с краном + объем гирь в 14 граммов. Этот последний найдем, приняв гири за латунные и считая объем одного грамма таких гирь за 0,12 куб. сант., как это свойственно большинству латунных гирь. Тогда объем шара с краном был W куб. сант., объем запаянного шара $= W + 1{,}68$ куб. сант. Итак шар с краном был или на 1,68 или по крайней мере на 0,14 кубического сантиметра меньше запаянного. На окончательный вывод из данных такое различие объемов однако не может иметь влияния, потому что вес кубического сантиметра вытесненного воздуха весов в отдельных опытах Реньо, нам не известен, а потому его должно принять постоянным, следовательно различие

[1] Часть их может быть происходит от опечаток, но они не указаны во II томе Relation.... при других опечатках I тома, где находится изложение опытов, стр. 136 и след.

весов, находимое по опыту (далее $P - p$), будет свободно от поправки на различие объемов сосудов.[1]

Девять отдельных взвешиваний, сделанных Реньо, состояли каждое из двух взвешиваний: сперва находился вес p, который прикладывался к шару с краном, когда этот шар, наполненный воздухом, был заперт при 0° и давлении H (при 0°), а потом доведен до обыкновенной температуры и уравновешен запаянным шаром. Затем из шара, опять при 0°, выкачивался воздух до того, чтоб осталось малое давление h, и тогда находился вес P, который надо было приложить к этому почти пустому шару для уравновешивания запаянного шара. Приводим все полученные данные:

	I	II	III	IV	V
H. мм.	761,19	754,66	758,61	746,10	747,23
p. грамм.	1,487	1,583	1,516	1,718	1,7005
h. мм	8,43	7,00	4,62	2,93	1,97
P. грамм.	14,041	14,1555	14,196	14,2115	14,232

	VI	VII	VIII	IX
H. мм.	747,21	753,76	774,46	774,41
p. грамм.	1,699	1,4375	1,0663	1,064
h. мм.	7,56	5,97	5,58	5,58
P. грамм.	14,1345	14,013	13,9915	13,9915

Чтобы найти по этим данным вес воздуха, вмещающегося в шар при 760 мм. давления, Реньо признает, что воздух следует закону Мариотта при переходе давления от H к h, а потому искомый вес x определяет по формуле: $x = \frac{P-p}{(H-h)}\,760$.[2] Допустив применимость закона Мариотта, все-таки следовало сделать поправку на потерю от веса гирь

[1] Назовем объем шара с краном W, а его истинный вес чрез A, а шара запаянного — вес B, объем V и пусть к первому, когда он наполнен воздухом, надо прибавить груз p, а когда он почти пуст — P граммов, чтобы уравновесить второй шар; назовем чрез d плотность гирь и чрез e вес куб. сант. воздуха весов, тогда, означая чрез Q истинный вес воздуха, наполняющего шар, и чрез q — истинный вес оставшегося воздуха, имеем очевидно:

$$A - eW + Q + p\left(1 - \frac{e}{d}\right) = B - eV.$$

$$A - eW + q + P\left(1 - \frac{e}{d}\right) = B - eV.$$

Отсюда истинная разность весов или вес воздуха, удаленного при выкачивании:

$$Q - q = (P - p)\left(1 - \frac{e}{d}\right),$$

что и принято в дальнейшем моем расчете, полагая $e = 0{,}0012$ и $\frac{1}{d} = 0{,}12$.

[2] Называя чрез Q вес, уравновешивающий запаянный шар, по Мариоттову закону имеем: 1) $x : Q - p = 760 : H$ и 2) $x : Q - P = 760 : h$, откуда и находится x.

в воздухе. Ныне ее нельзя сделать точно, ибо не известен вес кубического сантиметра воздуха весов при каждом опыте, но вследствие малости объема гирь его можно принять во всех опытах близким к 0,0012 грамма. Тогда получаем, как результат взвешивания,[1] следующую истинную разность весов наполненного и почти пустого шаров:

$$(P - p)\,(1 - 0{,}0012 \cdot 0{,}12) = (P - p)\,0{,}99986.$$

По этому находим истинный вес газа в каждом опыте и соответствующее ему, по Мариоттову закону, давление, а потому и x, то-есть вес воздуха, при давлении в 760 мм. при 0°

	I	II	III	IV	V
вес	12,6522	12,5707	12,6782	12,4917	12,5297
давление	752,76	747,66	753,99	743,17	745,26
x	12,7739	12,7782	12,7793	12,7746	12,7776
разность	— 24	+ 19	+ 30	— 17	+ 13

	VI	VII	VIII	IX
вес	12,4338	12,5737	12,9234	12,9257
давление	739,65	747,79	768,88	768,83
x	12,7758	12,7791	12,7742	12,7743
разность	— 5	+ 28	— 21	— 20

Средний вес = 12,7763 с вероятною погрешностью ±0,0005. Число это разнится от данного Реньо (12,7781) на 0,0018,[2] а весы были чувствительны до полумиллиграмма, следовательно наше число гораздо вероятнее, чем число, данное Реньо.

Далее Реньо нашел, что вес сосуда с открытым краном при 4°,2 и 757,89 = 1258,55 грамм. Приняв объем стенок шара с краном = = 440 куб. сант., что должно быть близко к действительности,[3] и объем 1-го грамма гирь считая опять за 0,12, получаем истинный вес шара = =1258,25 + 0,00127 (440 — 151) = 1258,917. Тот же шар, наполненный

---

[1] Доли граммов при расчете должно счесть платиновыми, то есть представляющими объем 0,05 куб. сант на 1 грамм, но в общей формуле сочтены все гири за латунные с объемом 1 грамма = 0,12 куб. сант.

[2] Эта разность зависит от двух причин: от того, что Реньо не ввел поправки на вес воздуха, вытесненного гирями (поправки = 0,0018) и от ошибок расчета или печати, которые однако уравновесились в среднем результате, так что поправка вышла такая, как будто только была одна первая погрешность. Реньо считает сам, что его отдельные наблюдения разнятся на $\frac{1}{2000}$ (III у него дало 12,7809, а I — 12,7741; разность = 0,0065), а в действительности разность не более 0,0054 $\left(\text{т. е. } = \frac{1}{2370}\right)$, а вероятная погрешность не более $\frac{1}{25\,000}$.

[3] Потому что оправа и кран, вероятно, весили не более 258 граммов и вытесняли около 30 куб. сант. воздуха, а самое стекло весом в 1 кило должно было вытеснять около 410 куб. сант. воздуха. Если здесь и сделана нами погрешность, то она почти уничтожится в результате, ибо этот объем взойдет и с +, и с — и притом умноженный на величину веса куб. сант. воздуха.

водою при 0°, в воздухе при 6°,0 и 761,77 мм. давления имел вес 11126,05; при повторении того же определения, когда температура воздуха была 6°,5, а давление 761,58, вес шара с водою (взятою при 0°) = 11126,10 гр.; в третьем опыте $t = 6°,2$, $h = 766,80$, вес = 11126,20. Среднее $t = 6°,3$, $H = 763,4$, средний вес шара с водою 11126,117. Вес 1-го куб. сант. воздуха, считая влажность = $^2/_3$, при этом = 0,001266. Объем воздуха, вытесненный сосудом = 440 куб. сант., водою около 9880, гирями = 1135, следовательно истинный вес воды с сосудом =

$$11126,117 + 0,001266 \cdot 9185 = 11137,745 \text{ гр.}$$

Следовательно, вес воды при 0°, вмещающейся в шар при 0° = 9879,83 гр., а так как, по предшествующему параграфу, веса равных объемов воды при 4° и 0° относятся, как 1 к 0,99987, то в шар при 0° взойдет воды при наибольшей ее плотности 9881,12 гр. Так как при 0° в тот же шар входит 12,7763 ± 0,0005 гр. воздуха при 760 мм. давления, то литр или такой объем, в который входят 1000 гр. воды, при наибольшей плотности, вмещает при 0° и 760 ± 0,05 мм. в Париже 1,29300 ± 0,00005 граммов воздуха. Это основное число разнится от числа Реньо 1,293187 на величину, превышающую возможную погрешность от того именно, что Реньо не исправил взвешивания свои на потерю веса гирь в воздухе.

Если погрешность 0,05 мм. в давлениях отнести к весу литра воздуха, то для Парижа он при нормальных условиях равен

$$1,29300 \pm 0,00012.$$

При *том же давлении* и той же температуре вес литра воздуха будет тот же, ибо величина эта есть не что иное, как отношение весов воды и воздуха, которое остается постоянным при перемене напряжения тяжести, как можно судить по существующим сведениям. [1] Это относится и до взвешивания гирями, потому что за нормальные гири нельзя принять иные, как те, которые сличены с прототипом; так как, при изменении веса данного объема воздуха от перемены напряжения тяжести, изменится во столько же и вес гирь, то следовательно вес литра останется тот же. Но давление, выраженное при разном напряжении тяжести одинаковыми столбами ртути, будет, конечно, другое; поэтому-то, если говорить о перемене веса литра воздуха с переменою места, то имеется в виду только перемена нормальных условий. Давление 760 мм. в Париже отвечает давлению на квадратный метр, выраженному в метрических (килограмм и метр) единицах = 13595,93 · 0,76 · 9,8096 [2] = 101361.[3] Если под давлением в 760 мм. при $g = 10$ м. взвесить литр воздуха, то вес его будет равен

$$\frac{(1,2930 \pm 0,00012) 10}{9,8096} = 1,3181 \pm 0,0001,$$

если принять, что напряжение тяжести в Париже = 9,8096 м.

[1] Нельзя ныне думать, что действие тяжести на газы различается от действия ее на другие тела.

[2] Напряжение тяжести в Париже, по наблюдению Борда и Кассина = 9,8088, а после исправлений Бесселя = 9,8096. Число 13595,93 есть вес кубического метра ртути в килограммах.

[3] Близость этого числа к 100 000 или давлению 1 кило на квадратный сантиметр при напряжении тяжести в 10 метров невольно заставляет желать, чтобы за нормаль-

Но если в данном месте, где напряжение тяжести $= g$ (в метрах), свесить литр воздуха, при 0° и 760 мм. давления, то вес его будет

$$0{,}13181g \pm 0{,}0001,$$

$$\lg = 0{,}11995 - 1.$$

Это соображение показывает, что, при помощи определения веса одного литра воздуха, можно определить напряжение тяжести. Точность такого определения может быть довольно велика, если вместо давления в 760 мм. взвешивание произвести над газом под давлением в 3 или 4 метра. Сущность дела здесь в том, что воздух представляет пружину всюду однородную, и мера ее упругости неизменна, а как изменение g можно мерять пружинными весами, то еще лучше можно для этой цели употребить упругость воздуха. Представим сосуд со сжатым воздухом при 0° и определим давление воздуха, в нем заключенного, под экватором. Пусть упругость воздуха = 4000 миллиметрам ртути при 0°. Если этот сосуд с воздухом перенести в Петербург, то здесь при том же объеме и той же температуре упругость запертого воздуха будет уравновешиваться давлением ртутного столба в 3984,5 миллиметра, если напряжение тяжести на уровне моря под экватором = = 9,7800, а в Петербурге = 9,8181, как следует по формуле Сабина. Различие двух давлений = 15,5 мм. позволяет произвести измерение его с точностью до $\frac{1}{1500}$, что отвечает в определении g погрешности 0,000025, какую дают и наблюдения с маятником.

Вопрос, затронутый здесь мною, весьма близок к существу предпринимаемых опытов, потому что при сличении их с данными Реньо, необходимо знать напряжение тяжести на месте производства опытов.[1] К сожалению, мы еще не обладаем достоверными числами для выражения напряжения тяжести в С.-Петербурге. Хотя опыты графа Литке над маятником, сличенным в Гриниче и Петербурге, дали для секундного маятника длину 441,0319 парижских линий,[2] но это число далеко не совпало с результатом прямых измерений, сделанных Савичем, Смысловым и Ленцем. Они нашли по наблюдениям над маятником *n*°1 длину секундного маятника в С.-Петербурге = 440,9397, а по *n*°2 440‴,9579, но не полагаются на свои числа, потому что подозревают у себя погрешность в сличении своей нормальной меры (хотя

ное давление было принято это круглое число, чтобы облегчить и обобщить сведения о газах. Такое нормальное давление в Париже будет отвечать высоте ртутного столба при 0° = 749,8 миллиметра ртутного столба или 10,13 метра воды при 4°, в С.-Петербурге это давление выразится 749,0 мм. ртути или 10,18 метра воды.

[1] Для определения изменения напряжения тяжести по изменению высоты ртутного столба, выражающего данную упругость, лучше всего, повидимому, применить образование паров, а особенно сгущенного сернистого ангидрида (SO^2), который при 0° имеет упругость 1165 миллиметров, а потому его упругость в СПБ. и Париже будет разниться около 1,24 мм., тогда как длины секундных маятников в этих местах отличаются на 0,95 мм.

[2] См. Наблюдения над маятником *Савича, Смыслова* и *Ленца*. Приложение к XIX тому Записок И. Академии Наук, № 1, 1871 г.

эта последняя всегда могла быть вновь проверена).[1] Среднее число этих наблюдений дает для напряжения тяжести в С.-Петербурге 9,8173 метра, а число Литке 9,8192. Известная формула Сабина ($g = 9{,}78009 + 0{,}050\,80\,\mathrm{Sin}^2\varphi$) дает для Петербурга $g = 9{,}8181$, почти среднее между числами Литке и Савича. Согласно с мнением Савича, Смыслова и Ленца для длины секундного маятника в С.-Петербурге, я удерживаю число из опытов Литке, откуда $g = 9{,}8192$ м. Тогда вес литра воздуха при 0° и при давлении в 760 мм. в месте моих наблюдений должно принять:

1,2943 грамма.

Это число и принято мною в основание при поправках на взвешивание в воздухе, встречающихся в этом исследовании. Погрешность его равна сумме погрешностей, проистекающих от взвешиваний Реньо ($= \pm 0{,}00012$) и от определения отношения напряжения тяжести в Париже и в Петербурге на месте моих наблюдений. Считаю не излишним заметить, что высота над уровнем Невы моего помещения около 4 метров, а вся высота над уровнем моря не более 5 метров, потому, хотя число 9,8192 отнесено к уровню океана, нет нужды в поправке — она гораздо меньше вероятной погрешности $\pm 0{,}000120$, а именно $= 0{,}000002$.[2]

Вес 1,2943 гр. отвечает чистому воздуху, без углекислоты и воды, а так как в 10 000 объемах воздуха должно принять 4 объема углекислого газа, его плотность по отношению к воздуху $= 1{,}525$, то вес литра воздуха с углекислотою $= 1{,}2946$, а потому, при упругости водяного пара, равной h, при давлении H и температуре t, вес литра воздуха в месте моего наблюдения (приняв плотность водяного пара $= 0{,}623$ по воздуху):

$$e_1 = 1{,}2946\,\frac{H - 0{,}377\,h}{(1 + \alpha t)\,760}\,. \qquad E$$

Значение α, данное для постоянного давления Реньо (0,003671), должно быть исправлено по отношению к расширению ртути, сообразно числам, приведенным на стр. 59 [=316] (у Реньо взят коэффициент расширения ртути $\frac{1}{5550}$), и тогда по данным Реньо оказывается, что $\alpha = 0{,}003673$. Значения, находимые по формуле E, служили мне для поправок на взвешивание в воздухе.

Май 1874. С. Петербург и Бовлово.

---

[1] Различие чисел Савича и Литке $= 0{,}083$ линии или почти 0,187 миллиметра так велико, что легко устранимо.

[2] Савич, Смыслов и Ленц вывели из своих наблюдений, сделанных в разных местах, от Финляндии до Бессарабии, выражение для секундного маятника, приняв в основание число Литке:

$$L = 439{,}2521 + 2{,}3779\,\mathrm{Sin}^2\varphi.$$

Отсюда можно извлечь следующее выражение для напряжения тяжести в метрах при широте φ в России:

$$g = 9{,}777959 + 0{,}053676\,\mathrm{Sin}^2\,\varphi.$$

Это выражение вероятнее для русских местностей, чем очень общее выражение Сабина и др., ибо g меняется с местными условиями. Отсюда, если высота места от уровня моря в метрах $= h$, то вес литра воздуха для России должно принять:

$$(1{,}2891 + 0{,}0692\,\mathrm{Sin}^2\,\varphi)\,(1 - 0{,}00000031\,h).$$

Третья глава

О некоторых практических приемах при исследовании упругости газов

Приступая к изложению самых опытов, цель и общие приемы которых указаны в двух предшествующих главах, считаю необходимым описать в отдельных главах некоторые из тех практических приемов и некоторые из тех приборов, которые употреблены мною в этой работе, не только по той причине, что одни из них более или менее изменены мною, сообразно целям исследования, и отличаются от общеупотребительных, а другие или не описаны вовсе, или мало известны, но еще и потому, что, посвятив много времени на устройство, изучение и улучшение некоторых приемов и приборов, я думаю, что отдельное и подробное описание их может принести свою пользу другим исследователям и покажет степень доверия, какую можно иметь к результатам, полученным с их помощью. Важнейшее место между приборами и приемами, которые мне следует описать в отдельности, занимают: мои нормальные и дифференциальные барометры, нормальный водородный термометр, воздушный — нефтяной термометр для обыкновенных температур, приемы для получения и определения постоянных температур, приемы для сличения отдельных шкал с нормальными, калибрация и определение коэффициентов расширения шкал, приемы взвешивания, устройство весов, сравнение разновесов, устройство катетометров и способ компарации катетометрами, способы герметического соединения частей приборов и устройство воздушных насосов. В описании отдельных исследований, касающихся этих приемов и приборов, я однако не могу держаться того порядка, в каком эти предметы подлежали изучению, потому что некоторые из приемов подлежат еще новой проверке,[1] а другие желательно подвергнуть более полному исследованию,[2] чем то, какое успел я сделать до сих пор,

---

[1] Первое место в изложении должно было бы принадлежать описанию метров и килограммов, их сличению с прототипами в Париже в 1872 г. и подразделению их на части (по этой то причине метр и способы его калибрования изображены на 1 таблице рисунков), потому что это составляло первую задачу моей работы, но я должен отложить этот предмет, потому что поверка первых (1872 г.) сличений с прототипами, которую мне желательно было сделать в текущем 1874 году, не могла быть еще выполнена, так как международный метр и килограмм еще не вполне готовы, а желательно сделать сличение моих норм и с этими новыми единицами. Весьма важная цель — учреждения точных международных мер, можно надеяться, будет скоро достигнута, благодаря тем трудам, которые в этом отношении предприняты и уже частью выполнены (как я знаю по личным сведениям июня 1874 г.) международною комиссиею и особенно французским ее отделом. Участие в деле выполнения новых мер многих ученых разных стран дает уверенность в том, что будут выработаны точные начала компарации и средства для получения возможно однообразных мер, что весьма важно для производства точных мерительных исследований.

[2] Это касается особенно устройства моих термометров, описание которых по этой причине я откладываю до следующих глав. В протоколах физического и химического обществ (см. журнал этих обществ за 1872, 1873 и 1874 г.) помещены краткие отчеты о том, что сделано мною до сих пор в отношении к устройству термометров и барометров. Эти краткие описания перешли затем в Berichte d. deutsch. Chem. Gesellschaft, в Bulletin de la société chimique de Paris и др.

а, потому стану в особых главах описывать только те из моих приборов и приемов, которые считаю законченными, сообразно главной цели моей работы. Поэтому начну с барометров, а именно с ртутных нормальных и с дифференциальных — нефтяных. Приборы эти были в течение двух лет многократно подвергнуты изучению, а потому могут быть описаны. Но прежде, чем перейти к их описанию, считаю необходимым сообщить о применяемых мною средствах для герметического соединения частей приборов, о тех насосах, какие употребляются в моих работах, о кранах, очищении сосудов, о сушении газов и об очищении ртути, потому что при устройстве барометров, равно как многих других приборов, назначаемых для изучения газов, указанные средства должны постоянно применяться и оказывают огромное влияние на результат и успешность работы. Если бы я не описал их теперь, в дальнейшем изложении мне очень часто бы пришлось прерывать ход описания приборов и наблюдений изложением и оценкою мелких подробностей практических приемов. В каждом из этих приемов, взятом в отдельности, нет особого значения или оригинальности, но совокупность их оказывает первенствующее значение на ход работы.

§ 29

При составлении приборов, назначаемых для изучения свойств газообразных и жидких веществ, весьма часто необходимо герметически соединять стеклянные части приборов как между собою, так и с металлическими частями приборов. Там, где можно употребить одно стекло, можно прибегнуть к спаиванию, но если части массивны, наполняются ртутью и подвергаются переноске и движению, то такое соединение спаиванием не только требует большого искусства, но и по исполнении там часто получаются трещины, прибор становится ломким, и его составление занимает очень много времени. Главный недостаток стекла, имеющий здесь значение, состоит в том, что оно, хотя и обладает значительною упругостью, но предел упругости так недалек, что от малейшего напряжения, зависящего, например, от неполного равенства коэффициентов расширения и небольшой перемены температуры спаянных стекол, получаются трещины. Для этой цели весьма важно иметь стекловатую массу, обладающую легкоплавкостью и некоторою степенью мягкости (пластичности), каких не достает у стекла при обыкновенной температуре. Такой сплав не будет, как стекло, давать трещин при неравенстве коэффициентов расширения соединяемых частей. Это особенно важно для соединения стеклянных частей с металлическими, ибо они часто имеют весьма различные коэффициенты расширения. Сплав этот для всех приборов, употребляемых при обыкновенных и низких температурах, может быть сравнительно легкоплавок, лишь бы при обыкновенной температуре он был тверд, что даже облегчает спаивание, производимое при его помощи; но он должен обладать сверх вышеупомянутых следующими качествами: a) нерастворимостью в жидкостях (вода, ртуть), содержащихся в приборах; b) отсутствием содержания летучих веществ, чтобы они не подмешивались к газам, содержащимся в приборе; c) отсутствием кристаллического сложения и порозности, при коих нет герметичности;[1] d) легкостью обращения с ним для быстроты составления и разборки прибора

[1] Каучук и гуттаперча, как общеизвестно, пропускают газы при значительной разности давлений.

(льняные замазки не имеют последнего свойства); e) способностью прилипать в расплавленном виде к стеклу и металлам и f) значительным сцеплением частиц сплава как между собою, так и между сплавом и стеклом или металлами. Ни металлические сплавы (растворимые в ртути и в большинстве случаев кристаллические), ни каучук (по его мягкости, порозности, отсутствию способности прилипать к стеклу и металлам), ни сургуч (по содержанию в нем летучих терпенов и по значительной хрупкости), ни большинство мастик, составляемых с водою (например, разные гипсовые и известковые цементы, хлорокись цинка и т. п. — по их порозности), ни замазки, составленные на высыхающем (льняном) масле (по продолжительности засыхания сколько-либо значительных масс и по скважности, подобной каучуковой) и т. п. не пригодны для этой цели. Наилучшими свойствами обладают из всех испытанных мною средств массы, содержащие в своем составе желатину, и сплавы, содержащие канифоль. Но желатинные или клеевые массы должны быть составлены на воде или спирте и очень трудно отдают последние их следы, требуют много времени для высыхания, изменяются от воды и неприменимы в тех случаях, когда требуется значительная масса, потому что тогда при высыхании получаются пустоты и даже трещины, а потому, хотя правильно составленные клеевые массы отлично прилипают к чистому стеклу и металлам,[1] пришлось ограничиться сплавами, содержащими канифоль. Сургуч и подобные ему сплавы, содержащие значительное количество терпентинного масла, при удалении его становятся хрупкими и плохо прилипают. Сплавы же, содержащие воск и канифоль, по возможности совершенно лишенную терпентинного масла, не имеют этих недостатков и потому, после многих испытаний, на них я и остановился. Разные сплавы воска и канифоли с подмесью различных порошковатых веществ были испытаны мною особенно по отношению к их способности разрыва и сцепления со стеклом и металлами. Для этой цели, при их помощи, снизу толстой стеклянной пластинки прилеплялся медный кружок испытываемою (конечно расплавленною) мастикою и определялся груз, потребный для отрыва. Разрыв происходил или около стекла, или около металла, или в массе мастики и при том при разных грузах. Нижеозначенная пропорция отвечает наибольшему грузу и

[1] Лучший способ составления клеевых замазок есть следующий: клей (шубный или рыбий) следует размочить в холодной воде (около 12 часов) до полного разбухания, слить воду, расплавить студень на водяной бане, снять пену, приливать понемногу крепкой уксусной кислоты, пока остывшая проба не останется жидкою, испарять до желаемой густоты, слить отстоявшуюся теплую массу в колбу и там постепенно смешать с желаемым количеством спирта и охладить. Такой клей, смешанный с порошковатыми веществами, отлично скрепляет стекло и металлы. Случай его применения встретился мне при составлении приборов, содержащих масло или нефть. После многих попыток оказалось, что пробка, пропитанная этим клеем и предварительно пригнанная для соединения частей, в совершенстве и герметически закрепляет стеклянные трубки в металлических оправах. После высушивания клея, масло или нефть не разъедают скрепления, и оно выдерживает значительные давления и соединяет герметически. Важнейший практический недостаток клеевой массы состоит в медленности высыхания.

наилучшему сцеплению как со стеклом, так и с металлом. Эта пропорция есть следующая:

1 000	частей	канифоли
250	„	желтого воска
400	„	окиси железа
1—10	„	льняного масла

Незначительные отступления от нее не имеют заметного влияния на свойства мастики, но увеличение пропорции канифоли делает сплав хрупким, увеличение же воска мягким. Количество окиси железа может быть значительно увеличено без уменьшения достоинств сплава, но зато и не улучшает их. Льняное масло прибавляется в различных количествах, смотря по требуемой степени тягучести сплава. Весьма важно при изготовлении такой мастики соблюсти указанные за сим предосторожности в приготовлении и выборе материалов.

Воск должно взять по возможности без подмесей и предварительно расплавить и слить для отделения от пены и осадка. Продажная канифоль, слабого бурого цвета и прозрачная, прямо может быть взята в дело, равно как и вареное льняное масло. Главное же внимание должно обратить на окись железа. Продажная мумия (красная кровельная краска) должна быть непременно предварительно прокалена до тех пор, пока не перестанет терять воды, и потом просеяна чрез мелкое сито. Сорта, содержащие глину, кирпич и т. п. подмеси, дают худшую мастику, а при употреблении непрокаленной мумии получается мастика, плохо прилипающая, легко отрываемая; тогда сплавленная мастика представляет не гладкую, а шероховатую поверхность; излом тогда кирпичный и такая мастика в тонких слоях проницаема для газов. Это зависит от выделения влажности в виде пузырьков пара, образующегося при расплавлении мастики.[1] Для приготовления сперва плавится воск на слабом огне в металлическом сосуде, потом в него мало по малу прибавляется вся канифоль и тогда, при слабом огне и постоянном помешивании, должно сплав нагревать до тех пор (часа три), пока он не перестанет издавать ясного запаха терпентинных паров при 150—200°. После того прибавляется понемногу окись железа и льняное масло, а затем сплав выливается в плитки.[2] Воск нельзя заменить парафином, а канифоль бесполезно заменять другою из общераспространенных смол, хотя из них и можно сделать хорошую мастику.[3] Но окись железа с пользою заменяется прокаленным и просеянным порошком пемзы, потому что тогда сцепление мастики со стеклом

---

[1] Такова по свойствам мастика, находимая иногда в продаже. Она вдвое слабее сопротивляется разрыву, чем приготовляемая мною.

[2] Для этого служат коробки из пергаментной бумаги.

[3] Так первые хорошие результаты получены были мною при употреблении сплава, содержащего мастикс (resina mastichis) и парафин. Смесь их следует предварительно нагревать долго и значительно.

возрастает. [1] Однако крепость спаивания при помощи мастики больше всего зависит от правильности применения ее при спаивании, а именно при этом необходимо наблюдать: 1) чтобы спаиваемые части были сухи и чисты, потому стекло лучше всего после вытирания смывать крепким спиртом и отнюдь после очищения не касаться руками тех частей, которые должны быть спаяны, потому что влага и жирные вещества, пристающие от рук, препятствуют полному прилипанию, и высушивать; 2) чтобы пред спаиваньем мастикою они были нагреты от 50 до 80°, но так чтобы при нагревании не осела влага; [2] 3) чтобы пред употреблением мастика была расплавлена в особом сосуде; [3] не содержала бы пузырьков воздуха или пара и имела соответственную цели степень жидкости; [4] 4) чтобы между сплавленною мастикою и спаиваемыми предметами не осталось пузырьков воздуха; 5) чтобы толщина слоя мастики, назначаемой для скрепления, была по возможности не велика, ибо иначе при остывании образуются пустоты; [5] 6) чтобы остывание было медленное; 7) чтобы при употреблении мастичного скрепления температура не возвышалась на долгое время [6] выше 35°, а для тех случаев, когда слой мастики должен выдерживать значительное давление, даже не выше 25°, ибо при температуре 25° сопротивление мастики разрыву уменьшается, а при 35° она приобретает некоторую степень тягучести, хотя и плавится только выше 50°. В тех случаях, когда требуется от мастики большая твердость и тугоплавкость, весьма полезно убавлять количество воску и масла и прибавлять к ней несколько процентов серы, но чрез то мастика становится более хрупкою. Для опытов, производимых при обыкновенной температуре, вполне удовлетворительна вышеприведенная пропорция. К удобствам ее применения должно прежде всего причислить постепенность плавления и переход в мягкое состояние (что и делает мастику подобною весьма легкоплавному стеклу); по этой

---

[1] Мастика с пемзою, нагретая до полного удаления пузырьков воздуха, представляет в тонких слоях массу полупрозрачную и потому в некоторых случаях по одной этой причине заслуживает предпочтения. Для этого пемзу можно заменить толченым стеклом.

[2] В большинстве случаев удобнее всего накалить спаиваемые части выше 100°, чтобы не осталось влаги, а по том дать охладиться до надлежащей температуры.

[3] Практичнее всего для этой цели иметь железную или медную чашку с ручкою, вмещая в нее за раз не более 20—40 граммов мастики и нагревая постепенно на слабом пламени лампы. Так как при моих работах мастика применяется для самых разнообразных целей, то у меня она всегда готова в нагретом состоянии. Это тем удобнее, что при продолжительном нагревании мастика окончательно теряет содержание летучих веществ, что важно в применении ее для скрепления частей, долженствующих содержать газы. Фарфоровые сосуды для мастики часто лопаются при начале нагревания, потому что коэффициент расширения мастики гораздо более, чем фарфора.

[4] Для заливки необходима жидкая, значительно нагретая мастика, а для залепливания — густая, вязкая. Вязкое и мягкое состояние длится в мастике долго при охлаждении и этим часто можно пользоваться в применениях ее.

[5] Эти пустоты должно заливать новою мастикою и устранять сдавливанием, когда мастика станет при охлаждении мягкою.

[6] В течение краткого времени мастика, по своей плохой теплопроводности и значительной скрытой теплоте плавления, не успевает размягчаться.

же причине она легко удаляется, при какой-либо неудаче прибор легко разбирается, скрепление исправляется. Если поверхность мастики равномерно сплавлена,[1] то нечего опасаться ни трещин, ни отделения части вещества, а потому предмет, содержащий мастику, можно взвешивать после погружения в водяную ванну точно так, как цельный стеклянный. Важнейшее же достоинство описываемой мастики для целей моего исследования состоит в том, что скрепления, производимые ею, совершенно герметичны и выдерживают без вреда значительные изменения давлений. Множество примеров убедили меня в том, что слой мастики столь же непроницаем для газов, как слой стекла. Весьма часто приборы, содержащие несколько мастичных скреплений, приходилось мне оставлять в соединении с манометрами на несколько дней и даже не раз на целый год с пустотою внутри почти абсолютною, с водородом или со сдавленным газом и, если замастичивание было устроено правильно, ни разу не замечено было просачивания газа чрез мастику, что можно было бы узнать по манометру, доведя газ до первоначальной температуры. Производя ряд опытов для определения тех давлений, при которых разрываются стеклянные трубки (эти опыты будут далее описаны), должно было вмастичивать их в оправы (см. IV таблицу рисунков, фиг. 7 и 8, где F и G суть стальные оправы, а K и K вмастиченные в них концы испытуемой стеклянной трубки); при этом ни разу не случилось, при правильном закреплении трубки, чтобы, при давлении изнутри, трубка вырвалась из оправы, хотя для разрыва трубок требовалось давление, достигающее в иных случаях до 200 атмосфер.

§ 30

Правильное и легкое скрепление мастикою достигается только тогда, когда для соединения применен соответствующий данному случаю способ. Для примера укажу на один случай, часто встречающийся при составлении газовых приборов, а именно: часто требуется закрепить широкую стеклянную трубку (или широкое горло прибора) в металлической оправе так, чтобы скрепление было не только герметично, но и столь совершенно, что по весу выливающейся из прибора ртути можно судить об объеме, занимаемом газом. Таков, например, случай составления манометров, подобных тем, какие столь успешно применил Реньо к изучению свойств газов. Требуемое скрепление в этом случае должно быть сплошным твердым телом, не содержащим неровностей, в коих могут остаться пузырьки воздуха, потому что если они останутся, то при разных давлениях будут изменять объем и, следовательно, вытеснять различное количество ртути. Если непосредственно вмазать трубку в оправу, то невозможно избежать указанных

[1] Придавливая мастику, пока она мягка, а по остывании сглаживая недостатки и удаляя излишек горячим ножом, можно достичь уже ровной поверхности, а проходя по ней за тем концом пламени паяльной трубки, легко достичь поверхностного сплавления, после которого мастика приобретает блеск и гладкость сплавленного сургуча.

пустот, а потому для подобного случая весьма полезно применять способ скрепления, мною многократно применяемый, изображенный на II-ой таблице рисунков, на фиг. 1-й.[1] *A* изображает разрез конца трубки, которую следует закрепить в металлической оправе *B*, которая также представлена в разрезе. В расширенном отверстии *C* оправы тогда должно закрепить (с помощью винта, пробки или притирания, но без герметичности) такую тонкую (металлическую или стеклянную) трубочку *D*, чтобы ее отверстие равнялось отверстию *C*. Трубка *D* должна выдаваться из отверстия оправы *B*. Когда эта оправа нагрета до надлежащей степени, в кольцеобразное пространство *E* вливается жидкая мастика, и тогда нагретый конец трубки *A* вставляется в эту расплавленную мастику. При этом легко достичь (пошевелив трубку *A*, пока мастика жидка), отсутствия пузырьков воздуха, а заткнув другой конец трубки *A* и высасывая из *C* воздух, можно поднять до желаемой меры уровень мастики, находящейся в трубке *A*, между ее внутренними стенками и трубкою *D*; снаружи же можно добавить мастики по мере понижения ее уровня. Если трубка *D* металлическая и закреплена в оправе винтом, то такое скрепление сверх других свойств своих увеличивает еще сцепление между оправою и трубкою. При этом, если оправа *B* находится в тяжелом приборе (например, в сложном манометре для высоких давлений), то прямое или обыкновенно применяемое вмастичивание (без трубки *D*) легко может повести к тому, что отверстие *C* зальется мастикою, чего в применяемом мною способе случиться не может. Рис. II—10 и II—14 представляют видоизменения того же способа скрепления. На первом из них изображен разрез скрепления двух трубок *A* и *B* равного диаметра. Для этой цели конец *B* вытянут в *C* и на *B* надета (стеклянная или металлическая) широкая трубка *E* при помощи пробки *D*. Пространство *m* заливается мастикою. Этим способом скреплялись в моих исследованиях стеклянные трубки манометров, чтобы придать им надлежащую длину. Скрепление рис. II—14 только тем отличается от предшествующего, что в нем нет суженного места, и наружная трубка *D* прямо припаяна к внутренней *B* для образования вместилища *m* мастики. Это скрепление так легко разбирается (нагреванием *D*) и вновь собирается, что пригодно особенно в тех случаях, когда требуется такая легкость соединения и разъединения частей. Скрепление рис. II—11 проще предшествующих и делается очень скоро, назначено для соединения трубок *A* и *B* равного диаметра. Для этой цели на нижнюю трубку надевается с помощью пробки *D* [2] более широкая трубка *E*, которая сперва опускается ниже надлежащего своего положения, чтобы верхний конец *B* был свободен. На него надевается короткий кусок *C* каучуковой

[1] Для краткого обозначения ссылки на рисунки, приложенные к этому сочинению, я стану употреблять способ, очевидный из примера: Рис. II—1 означает ссылку на II-ю таблицу, рисунок 1-й. Дробь, вставленная под нумером рисунка на таблице, означает отношение величины рисунка к величине действительного предмета. Там, где нет такой дроби — размеры изображенного предмета бывают разнообразны. Таков случай изображения мастичных скреплений на таблице II.

[2] Вовсе не требуется плотности пробки, потому что не очень перегретая мастика не льется чрез тонкие отверстия.

трубки, которая надета и на нижний конец трубки *A*. Когда это сделано, трубка *E* поднимается до надлежащего своего положения и после нагревания пространство заливается мастикою. Вместо куска каучуковой трубки *C* можно обвить место смыка *A* и *B* бумажною полоскою или даже облепить его мягкою мастикою, потому что, в некоторых случаях, можно опасаться влияния каучука на газ, содержащийся в приборе, или на объем его. На рис. II—4 изображено точно такое же скрепление горизонтальных трубок *A* и *B*. При этом на каждую из них надевается пробка *D* и *E* с отверстием и обе они окружаются снизу и с боков бумагою так, чтобы образовался род коробки, внутрь которой и вливается мастика. Если такое скрепление приходится делать для тонких трубок (чаще капиллярных), то в пробках и коробке нет нужды, потому что, надев на концы *A* и *B* скрепление *C* (рис. II—5), место это можно облепить густою мастикою *m* и, пока она еще не застыла, обвить бумагою (лучше пергаментною) и обвязать нитками. Чрез сдавливание, происходящее при этом, мастика весьма плотно прилегает к тем частям трубок *A* и *B*, на которых нет соединения *C*, и чрез то получается герметическое скрепление. Применение мастики особенно облегчает сборку таких приборов, в которых должно соединять трубки неодинакового диаметра, например, закрепить газопроводную трубку в горле вульфовой склянки или в широкой трубке сушильного прибора. В таком случае, употребляя мастику, нет нужды в хорошей пригонке или доброкачественности пробки, что составляет, как известно всем занимающимся составлением приборов, дело и хлопотливое, и неверное. На рис. II—2 изображено такое скрепление узкой трубки *A* в горле *B*. Едва пригнанная, короткая и неплотная пробка *C* служит при этом только препятствием для прохода мастики, заливаемой в *D* в часть горла *B*, находящуюся ниже пробки. Так собираются с большою легкостью сложные герметические сушила, какие приходится постоянно применять при изучении газов. При составлении приборов, соединения узких трубок с широкими иногда должны быть более надежны и прочны, чем предшествующие, и в них полезно избежать прикосновения газа к пробке. В таком случае мастика должна быть нанесена не только сверх пробки, но и под нею. Для этой цели, надев на конец узкой трубки *B* (рис. II—13) пробку *C*, должно облепить его конусом мастики *mm*, как видно на рисунке, дать ей застыть, нагреть *A* и тогда вставить, держа *A* концом вниз, трубку *B* с *C* и *m* в конец *A*, потом подогреть место, где находится мастика, до полного ее расплавления, и в этом положении дать мастике застыть. Перевернув затем скрепу широкою трубкою вниз, поверх пробки можно влить слой мастики.

Видоизменяя вышеописанные способы скрепления сообразно обстоятельствам, легко достичь и прочного (то-есть неизменного при значительной перемене внутренних давлений), и в то же время герметического скрепления самых разнообразных частей приборов. Прочность особенно велика будет тогда, когда по направлению, перпендикулярному давлению, скрепляющий слой мастики будет мал, а по направлению давления велик, то есть когда скрепляемые трубки будут мало разниться диаметром (например, в рис. II—10 *A* мало отличается от

C и E) и когда слой мастики будет велик. Если прибор, в котором есть подобное мастичное скрепление, назначается для измерения объемов при высоких давлениях, то необходимо пред началом опытов произвести наивысшее давление на слой мастики, чтобы затем не иметь остаточных, пластических изменений, происходящих в ее массе, а упругие изменения формы в этом случае определятся при измерении сжимаемости сосуда от давлений.

Услуги, оказываемые мастикою, не ограничиваются одним прочным и герметическим скреплением частей приборов, хотя это и есть главная ее цель. Мастика служит мне и для множества других потребностей. Так при ее помощи такие пористые сосуды, как чугунные, легко делаются непроницаемыми для газов, ртути и воды, что весьма часто приходится требовать. Во множестве случаев мастика заменяла мне припой, например, при закреплении крышки или дна в металлических или стеклянных сосудах. Она оказывается весьма полезною там, где требуется сделать прибор неподвижным. Для этого ножки прибора или вообще части, служащие для опоры, заливают мастикою на подставке.[1] Мастикою легко заменить во многих случаях кран, потому что, расплавленная, она дает проход газу, а остывшая запирает отверстие. Выполняя в расплавленном виде с полным совершенством все формы, мастика после застывания представляет отпечаток, могущий в некоторых случаях служить с пользою для исследования и сборки приборов. Для того, чтобы этот отпечаток легко отстал по остывании мастики, достаточно предмет покрыть тонким слоем жирного вещества или смочить глицериновым раствором. Подобным образом устроил я однажды втулку для вращения около оси изогнутой стеклянной трубки. Словом услуги, доставляемые мастикою, так многоразличны, что мне при моих работах приходилось применять ее на каждом шагу, и многие из друзей моих, имевшие случай применять ее для разных целей, также отзывались о ней с похвалою, что и заставило меня описать это вспомогательное средство с некоторою подробностью.

§ 31

При испытании и приготовлении приборов, назначенных для газов, при высушивании этих приборов, при замене одного газа другим, словом во всех случаях изучения газов, необходимо на каждом шагу прибегать к помощи воздушных насосов, а потому весьма важно как для успешной работы, так и для достоинства результата иметь удобные и совершенные воздушные насосы. Обыкновенный, поршневой

[1] Когда требуется временно закрепить легкий предмет (напр., шкалу около трубки, трубку пред окуляром для измерения диаметра и т. п.), весьма важно иметь мягкую, воскообразную мастику. Лучшую массу этого рода составляет сплав, сделанный моим другом Г. А. Шмидтом для этой цели. Он содержит 100 ч. желтого воска, 6 ч. венецианского терпентина, 8 ч. скипидарного масла и 10 частей смолы елеми. Сплав этот мнется в руках и отлично прилипает к стеклу и металлам, а при обыкновенной температуре довольно вязок для удержания легких предметов. Прилепив им предмет пред объективом микроскопа, легко установить его затем слабым давлением в желаемом положении.

насос не имеет этих свойств, потому что громоздок, требует постоянной ручной работы и частых починок, а при том дает пустоту очень несовершенную. [1]

Для большинства потребностей, встречающихся в исследовании газов, однако нет нужды в совершенном насосе, но взамен того необходимо удобство применения. Этому вполне удовлетворяют недавно изобретенные водяные насосы, а потому в моей лаборатории они и применены к делу. Из этих насосов *пульсирующий насос* г. Ягна, описанный и исследованный мною, Шмидтом и М. Кирпичевым, [2] постоянно применяется мною вследствие легкости его устройства, простоты его действия и значительности разрежения, легко достигаемого им. Два таких насоса, расположенных в двух концах помещения, назначенного для опытов, около водяных раковин при водопроводе, снабженные толстостенными [3] каучуковыми трубками такой длины, что они достигают до всех мест помещения, позволяют применять живую силу воды, текущей из водопроводных труб, для выкачивания воздуха из всяких приборов, не трогая их с места и не перенося насоса, что весьма важно для быстроты работы. Достаточно соединить конец каучуковой трубки с сосудом, из коего должно выкачивать воздух, замастичить место соединения и отворить водяной кран при насосе, чтобы действие совершилось. При всем несомненном своем удобстве, пульсирующий насос представляет тот недостаток, что в нем главную роль играет довольно тонкая каучуковая трубка, [4] которая иногда лопается. Этого нет в водяном насосе, изобретенном *Ланом* (H. Lasne) и основанном на расширении водяной струи, вытекающей из конического расширяющегося отверстия. Этот насос действует столь же хорошо, как и пульсирующий, занимает места еще менее, чем он, [5] начинает действовать, как этот последний, с открытием водопроводного крана и имеет пред пульсирующим насосом то важное преимущество, что весь сделан из металла (или стекла) и присмотра требует еще менее, чем предшествующий. Описание его помещено в Bulletin de la Société chimique de Paris, 1873 г., XIX, p. 291. Необходимо заметить, однако, что насос этот действует очень слабо при малом падении воды и потому может вполне заменить пульсирующий насос только там, где давление воды, как в лаборатории С.-П. Университета, достигает до значительной меры (около 11 метров), тогда как пульсирующий насос работает весьма удовлетворительно и при очень малых давлениях притекающей воды.

[1] Один только из многих бывших у меня в распоряжении поршневых насосов давал пустоту менее 1 миллиметра, другие, когда исправны, доставляют давление не менее 1—2 мм.

[2] Журнал русского химического общества 1872 г. содержит полное описание, а сокращенное помещено в Liebig's Annalen der Chemie und Pharmacie 1872 г.

[3] Для выкачивания требуется толстостенный каучук, не сжимающийся от давления атмосферы и при сгибе; при толщине сген 5 мм. и диаметре отверстия в 6 мм. бурый (вулканизированный) каучук совершенно хорош для этого дела.

[4] Для привода воды нельзя взять толстостенную каучуковую трубку, потому что она не пульсирует, а тонкостенная легко лопается от напора воды.

[5] Такой насос обыкновенно занимает не более 25 сант. в высоту, 10 в ширину и 2 сант. в толщину. Располагать его удобнее всего, как и пульсирующий насос, прямо над водопроводной раковиной.

В пустоту, образующуюся при действии вышеупомянутых водяных насосов, выделяется воздух, растворенный в воде, и водяной пар, а потому разрежение, достигаемое такими насосами, не может превосходить, при обыкновенных условиях, 15—20 миллиметров, хотя бы, как и следует делать, между насосом и прибором помещено было сушило. Во множестве случаев (при испытании приборов, обыкновенном высушивании и т. п.), большого разрежения и не требуется, а когда оно необходимо, должно прибегать к помощи ртутных насосов. *Насос Гейсслера*[1] с резервуарами, вмещающими около 20 килограммов ртути, постоянно применяется в моих исследованиях. Наилучший способ применения такого насоса состоит в комбинации его с водяным насосом, как то изображено, например, на рис. VII—4. Налево в M_1 виден водяной кран для действия пульсирующего насоса M, расположенного над водяною раковиною. Вытяжная каучуковая трубка этого насоса снабжена сушилом N для того, чтобы влажность не могла попадать в ртутный насос L. Эта вытяжная трубка соединена с тем отверстием R_1 ртутного насоса, чрез которое выходит из него воздух. При начале действия оба R_1 и R_2 крана ртутного насоса открыты и действует только водяной насос. Когда разрежение, производимое им, достигнет возможной величины, тогда начинается действие ртутным насосом. Для этого боковой его кран R_2 запирается, сосуд L_1 поднимается, и когда ртуть дойдет до верхнего крана R_1, этот последний запирается, сосуд L_1 опускается, кран R_2 отворяется и потом вновь затворяется, а сосуд L_1 вновь поднимается. Когда чрез это поднятие воздух в резервуаре L несколько сгустится (примерно до упругости воздуха в водяном насосе), тогда кран R_1 открывается и поднятие сосуда L_1 продолжается до того, чтобы часть ртути вошла в кран R_2, который тогда запирается. Так продолжается выкачивание до возможной меры. Такой способ действия ведет очень быстро к возможно хорошему результату, потому что удаляемый из ртутного насоса воздух имеет столь малую упругость, как воздух в водяном насосе. Для верности действия в подобной комбинации насосов очевидно необходимо, чтобы все соединения держали герметически, и здесь то мастика оказывает все свое преимущество, потому что при ее помощи можно легко исправить все замеченные недостатки скрепления, оказывающиеся по опусканию ртути в манометре, присоединенном к насосу. Описанная комбинация доставляет возможность получить пустоту, не только далеко превосходящую ту, какую дают обыкновенные поршневые насосы, но и более совершенную, чем та, какая получается при простом действии одного ртутного насоса, потому именно, что выделяющийся из насоса воздух в описываемом случае имеет упругость, гораздо меньшую, чем атмосферный воздух. Дело в том, что в Гейсслеровском ртутном насосе есть два стеклянных крана. Такие краны выделываются г. Гейсслером в Бонне со всем возможным совершенством, в чем я убе-

[1] Насос такого же рода (с небольшими улучшениями), выделываемый парижскими механиками братьями Альверниа, представляет совершеннейшую форму приборов этого рода.

дился многократно, [1] но для этого они требуют правильной смазки спуском (сплавом сала и воска). Эта смазка, а также и шероховатость поверхности стекла около самых кранов ведут к тому, что в этих местах остается (прилипает) некоторое количество воздуха. Сверх того спуск расходится по ртути и стенкам резервуара и препятствует полному прикосновению ртути к стеклу, а потому позволяет оставаться в резервуаре некоторому количеству воздуха в виде пузырьков. Этот прилипший воздух соответствует вредному пространству обыкновенных поршневых насосов, а потому Гейсслеровские ртутные насосы полной пустоты доставить не могут, хотя ими легко достигается упругость, меньшая 0,2 мм. Далее насос почти не действует. Некоторую роль при этом играет, вероятно, и каучуковая трубка ртутного насоса, соединяющая оба его резервуара. Она, вероятно, пропускает отчасти воздух и влагу. [2] Во всяком случае для меня не подлежит сомнению, что при помощи обыкновенных насосов системы Гейсслера невозможно достичь пустоты не только абсолютной, но даже и бо́льшей некоторого предела, за который должно считать в практике 0,2 миллиметра ртути. [3] Если ртутный насос действует один, то воздух, удаляемый от него при открытии верхнего крана, имеет упругость атмосферы, а следовательно и прилипшие пузырьки будут содержать воздух этой упругости. Если же насос Гейсслера действует в комбинации с водяным, то выделяющийся воздух может иметь упругость только 20—30 мм., а потому в оставшихся пузырьках воздуха масса газа будет гораздо меньше. Но все же газ остается [4] и совершеннейшей пустоты не получается. В тех же случаях, когда желательно получить Гейсслеровым насосом более совершенную пустоту, необходимо прибегать к комбинации двух ртутных насосов.

§ 32

Более совершенной пустоты можно достичь насосом Шпренгеля, но и то только при известных условиях, при отступлении от которых он мало превосходит насос Гейсслера, представляя противу него важный практический недостаток — медленность действия. В первона-

[1] Один из кранов (при втором из устроенных мною приборов для изучения упругости разреженного воздуха, по окончании опытов остававшемся без действия) держал пустоту, не пропустив нисколько воздуха, в течение 10 месяцев. Это доказывает, что чрез слой спуска нет заметной диффузии воздуха.

[2] Трубку эту и ей подобные, употребляемые в других случаях, я не только внутри тщательно очищал (последнее очищение производилось проливанием чрез трубку ртути до того, чтобы она вытекала чистою), но и пропитывал ее поры, если можно так выразиться, ртутью. Для этого трубка наполняется ртутью и производится на нее значительное давление, чрез которое ртуть и вталкивается в поры, как то видно при разрыве такой трубки.

[3] О столь малой упругости можно судить с некоторой точностью только по очень совершенному манометру; обыкновенные, находящиеся при насосах, манометры часто содержат воздух и при более совершенном насосе дают иногда даже отрицательное показание.

[4] Не происходит ли он от разложения сала? Смотри конец главы и начало следующей.

чальном своем виде,[1] насос Шпренгеля не мог давать совершенной пустоты уже по одной той причине, что воронка, служащая резервуаром ртути, протекающей чрез прибор и увлекающей воздух, содержала малый слой ртути и с этою последнею легко могли врываться в пустоту частицы воздуха и влажности. Более совершенное устройство представляет прибор, употребляемый Девилем и фабрикуемый Альверниа в Париже, но наибольшим удобством и другими достоинствами отличается изменение, сделанное Вейнгольдом.[2] В том виде, какой придал этому прибору Вейнгольд, воронка действует только при начале разрежения, и затем, когда упругость оставшегося воздуха будет уже мала, дальнейшее действие прибора совершается при помощи весьма простого сифонообразного приспособления. Еще более упрощается насос Шпренгеля при полном удалении воронки, потому что первоначальное разрежение воздуха можно произвести при помощи водяного насоса. В этом виде и устроен применяемый мною насос Шпренгеля. При его применении замечаются следующие обстоятельства, влияющие на совершенство результата: 1) новый, чистый прибор действует быстрее и и совершеннее, чем тот, который уже был в употреблении; 2) на том месте, куда ртуть падает и где захватывает воздух, замечается в темноте ряд искр, зависящих от электрического напряжения и разряда,[3] а затем в этом месте стенки трубки покрываются порошковатым кольцом окисленной ртути; 3) около этого кольца затем задерживается пузырек воздуха и далее вниз движение ртутных капель уже становится не столь правильным, ртуть сбегает отчасти по стенкам, а потому столбики ртути уже не действуют, как совершенные поршни; 4) если взять очень тонкие трубки (в 2 мм.), — прибор работает чересчур медленно,[4] а чем трубки более широки, тем скорее совершается вышеописанное образование кольца и хорошее действие прибора нарушается; 5) наилучшее действие прибора замечается при употреблении чистейшей, перегнанной ртути.

Все эти обстоятельства объясняются тем, что в приборе ртуть окисляется на счет остатка воздуха под влиянием электричества, а образовавшиеся окислы пристают к стенкам, препятствуют полному прикосновению ртути к стеклу и замедляют течение ртути. Однако же при помощи Шпренгелева насоса, недавно очищенного, весьма верно, хотя и очень медленно, достигается такая степень пустоты, что на возможно совершенном манометре не замечается упругости оставшегося воздуха и при обыкновенной температуре нет видимого разряда электричества от румкорфовой спирали, приведенной в действие одним хромовым элементом, при расстоянии электродов в 3—4 сантиметра.

---

[1] Например в том виде, в каком его применял Грее в своих исследованиях над просачиванием газов чрез каучук.

[2] Repertorium der physikalischen Technik 1872.

[3] Многократно при переливании больших количеств ртути чрез стеклянные и каучуковые трубки я получал значительные искры, так что полагаю возможным применять движение ртути для получения электричества.

[4] Но зато гораздо правильнее и дольше, а потому мне кажется весьма полезным устроить соединенную систему нескольких Шпренгелевых насосов с сифонами Вейнгольда; но такой сложный насос я еще не успел устроить.

Эти признаки, как мы увидим далее, не могут служить ручательством совершенной пустоты, но указывают на относительное совершенство насоса, устроенного на начале Шпренгеля, потому что с насосом Гейсслера, не говоря уже об обыкновенных насосах, нельзя достичь сколько-либо подходящего к этому результата (не прибегая к комбинации двух ртутных насосов или чему-либо подобному).

Обстоятельства, исчисленные выше, заставили меня полагать, что действие насоса Шпренгеля может быть еще более улучшено, если: 1) увеличить скорость капель, действующих как поршень, заставляя их падать с некоторой высоты, прежде чем они дойдут до узкого места трубки; 2) уменьшить длину той трубки, по которой проходят перемежающиеся пузырьки воздуха и капли ртути, и чрез то увеличить вероятность удаления захваченных пузырьков воздуха; 3) устроить переливание ртути так, чтобы при этом она лишалась воздуха и влаги, увлеченных ею; 4) ускорить работу прибора, увеличивая диаметр приводящей трубки, а сокращая до надлежащей меры только вытечное отверстие этой трубки и 5) устранить по возможности влияние образующегося кольца окислов ртути, перемещая все ниже и ниже место его образования при помощи искусственного перемещения уровня ртути в нижнем резервуаре насоса. На этих основаниях устроен прибор, изображенный на рис. IX—1. Насос Шпренгеля здесь состоит из резервуара G и трубки gd, диаметром в 3 мм; а длиною только в 300—400 мм. Нижний конец ее погружен в резервуар D, кончающийся внизу, стеклянною трубкою ee, с краном (или зажимом) F и с расширением E. На конце этой трубки надета каучуковая трубка r, чрез которую выливается ртуть в сосуд R. Если желательно переменить уровень ртути в D и d, то это достигается изменением положения сосуда R. Наверху сосуда D герметически вделана трубка с краном C, идущая к сушилу ab и к водяному насосу. На рисунке изображен насос B Лана, действующий при открытии водяного крана A и расположенный над водяною раковиною A.[1] В начале действия прибором кран C открыт и насос B приводится в действие, кран F заперт. Из H, G и сообщенных с ними приборов воздух по возможности высасывается насосом B. Тогда из сосуда Q ртуть поднимается по трубке L до K, то-есть высоты, соответственной разности давлений атмосферы и воздуха в G. Когда все возможное действие достигнуто при помощи насоса B, тогда кран F открывается, сосуд R поднимается до тех пор, пока ртуть в D дойдет до трубки c, тогда кран C запирается, а сосуд R опускается. Чрез это в G и D получается еще меньшее давление, чем может дать насос B. Теперь можно заставить действовать насос Шпренгеля. Для этого в сосуд Q вливается ртуть.[1] От этого уровень в Q и L поднимается, и ртуть переливается из широкой трубки K с тонким (в 2 мм.) отверстием k в G и трубку gd, причем завлекается из G воздух и переходит вместе с падающею ртутью в D. Когда здесь скопится много воздуха, уровень

[1] Нижняя часть сосуда Q сделана длинною для того, чтобы входящая в L ртуть успевала отстаиваться; сверх того в трубке L сделано расширение, как в приборе Девиля (и Альверниа) для выделения влаги и воздуха, могущих увлекаться ртутью, а для ее поглощения присоединено сушило P.

ртути понижается, что случится, если сосуд, сообщенный с H, откуда выкачивается воздух, велик. Тогда в *g* ртуть будет стоять высоко, а потому капли ртути будут тогда захватывать мало воздуха. Тогда приводится в действие насос *B* и воздух из *D* удаляется, как в начале опыта. Изменяя уровень ртути в *D* и упругость воздуха в этом же сосуде, можно изменять уровень ртути в *g* и чрез то переменять положение того места, в котором образуется вышеупомянутое кольцо окислов ртути.

Описанное видоизменение Шпренгелева насоса представляет следующие достоинства: сперва действием водяного насоса производится первое выделение газа, чрез что действие значительно ускоряется и пустота достигается гораздо быстрее, а совершенное действие этого прибора продолжается гораздо долее, чем в обыкновенном Шпренгелевом насосе. Что же касается до совершенства получаемой пустоты, то повторяю опять, что с насосом Шпренгеля легко получается пустота такая, что возможно совершенный ртутный манометр не показывает никакого остатка упругости, и пустота, *при обыкновенной тем ературе*,[1] не пропускает электрического разряда (не дает светящихся полос, как в Гейсслеровых трубках) от румкорфовой спирали, заряженной одним элементом.[2] Такая степень пустоты удовлетворяет всем обыкновенным требованиям, хотя, как увидим в следующей главе, это и не есть абсолютная (торичеллиева) пустота. В отличие от последней мы станем называть такую пустоту *манометрическою*.

§ 33

Такой же степени пустоты можно, конечно, достичь и при помощи ртутного насоса, подобного насосу Гейсслера, если устроить его без кранов, потому что они составляют причину несовершенства этого прибора. Когда я устроил и испытал тот род приготовления сифонных барометров, который будет описан в следующей главе и при коем остаток воздуха удаляется из барометра чрез нисходящую капиллярную трубку,[3] тогда применил тот же принцип и к устройству ртутного насоса, потому что он в сущности есть ничто иное, как видоизменение барометра. Такой насос представлен на рис. VII—3 в простейшей своей форме. На деревянной вертикальной и неподвижной доске, стоящей на широкой деревянной подставке, прикреплен стеклянный яйцевидный сосуд B, верх которого постепенно переходит в тонкую трубку *CC*, диаметром

[1] При нагревании даже слабом и после него уже замечается прохождение электричества, что, вероятно, зависит от выделения газа из ртути, как о том можно судить по опытам, далее излагаемым.

[2] В этом и других подобных случаях легко было делать подобное испытание, погрузив платиновые концы проволок, идущих от спирали, одну — в резервуар *E*, а другую — в резервуар *Q* и открывая кран *F*. Еще удобнее вплавить мастикою в сосуды *D* и *Q* концы платиновых проволок. Тогда можно производить испытание и при разных расстояниях электродов.

[3] Об устройстве этого барометра я сообщил физическому Обществу в мартовском заседании его 1874 г. См. Журнал Русск. Хим. Общ. и Физ. Общ. VI—5-й выпуск.

около 2 мм. Воздух, находящийся в *B* при поднятии ртути, изгоняется чрез *C*. Нижний конец этой трубки погружен в сосуд *ED* с носком *G* для вытекания избытка ртути, а потому в *E* уровень ее почти постоянен. Когда в *B* образуется (при опускании сосуда со ртутью *O*) пустота, тогда ртуть из *E* восходит по трубке *C* до барометрической высоты. Для поднятия и опускания сосуда *O* со ртутью служит шнурок *R*, прикрепленный к подвижной доске *TQ*, могущей вращаться около горизонтальной оси *T*. На этой подвижной доске укреплен шарообразный сосуд для ртути *O* и идущая от него широкая стеклянная трубка *N*. Нижний ее конец соединен каучуковою трубкою со стеклянною трубкою *A*, которою оканчивается сосуд *B*. Таким образом при поднятии сосуда *O* воздух и за ним часть ртути вытесняется из *C* чрез *G*, а при опускании сосуда *O* в *B* и *C* образуется пустота, потому что высота трубки *A* более барометрической. На подвижной доске *N* приделаны ножки *Q* и *P*, определяющие предел поднятия и опускания этой доски, для того, чтобы предохранить сосуд *O* от ударов. В трубке *A* под сосудом *B* сбоку приделана восходящая стеклянная трубка *H*, которая потом загибается вниз и соединяется в *L* с сосудом, из коего выкачивается воздух. Высота этой трубки *HK* над верхним положением сосуда *O* должна быть более барометрической, потому что при образовании пустоты в *HK* и при поднятии сосуда *O* ртуть в *HK* поднимается на барометрическую высоту. При опускании сосуда *O* сперва ртуть в *HK* опускается, а потом, когда в *B* образуется пустота и ртуть станет ниже колена *H*, воздух из *HK* входит в пустоту. Этот воздух при новом поднятии сосуда *O* и вытесняется в *C*. Таким образом вся работа при этот насосе состоит: 1) в поднятии и опускании сосуда *O* со ртутью и 2) в переливании время от времени ртути из *F* в *O*. В нем нет таких кранов, присутствие которых не только замедляет работу Гейсслерова насоса, но препятствует образованию совершенной пустоты. При употреблении описываемого насоса должно соблюдать некоторую осторожность только при начале выкачивания, потому что тогда при скором опускании *O* воздух быстро врывается из *HK* в *B* и получаются удары ртути, но их нет при дальнейшем выкачивании и они не опасны, потому что конический верх сосуда *B* способствует смягчению этих ударов. Насос этот в своем устройстве может представлять несколько видоизменений, из которых упомяну только об одном, в котором подъем и опускание сосуда со ртутью заменяют движением свободного (а не плотного) поршня в неподвижном сосуде со ртутью, прикрепленном внизу прибора. Ртуть трудно проникает чрез очень тонкие отверстия, а потому движущийся неплотный поршень заставляет подниматься и опускаться ртуть, как будто бы действовал плотный поршень, и при этом совершенно избегается каучуковая смычка и действие поршнем становится очень легким. В самых первых образцах описываемого насоса я соединял сосуды *B* и *O* каучуковою трубкою, как в насосе Гейсслера, но тогда чрез некоторое время внутренние стенки насоса пачкаются и их необходимо вновь очищать. Разборка прибора, составленного при помощи мастичных смычек, легка, но все же лучше избежать этой продолжительной операции. Описываемый насос представляет пред дру-

гими ртутными насосами, следующие преимущества: 1) Его устройство при помощи мастичных смычек весьма легко, что могу подтвердить тем, что первый экземпляр этого насоса был устроен у меня гимназистом Ф. Я. Капустиным в один день, когда я сам был занят другою работою. Если иметь сосуд *B* с вытянутою трубкою *C* и с припаянною короткою боковою трубкою *H*, то все прочие части прибора делаются из трубок и соединяются мастикою. 2) Устройство самого сосуда *B* облегчается тем, что он не велик, и это практически важно в том отношении, что требуется мало ртути, ныне весьма ценной. Здесь нет, как в приборе Гейсслера, нужды в большом сосуде, потому что между двумя поднятиями нет нужды прибегать к действию кранами, а потому и при малой емкости сосудов действие насоса быстро. Эти два обстоятельства делают устройство нового насоса легким и дешевым.[1] Действием описываемого насоса достигается такая же манометрическая пустота, какую может доставить насос Шпренгеля, но сравнительно с этим последним пустота достигается гораздо быстрее. Для достижения этого результата требуется ртуть чистая и сухая. С этою предосторожностью насос Гейсслера не может дать такой пустоты. 4) Описываемый насос дает легкую возможность испытания степени достигнутой пустоты при помощи румкорфовой спирали, потому что один электрод погружается в сосуд *O*, другой в *E*. 5) Заливая мастикою горло сосуда *E* и закрепляя в нем капиллярную трубку *C* герметически, а горло *G* соединяя с водяным насосом, легко, без особых новых приспособлений, достигается возможность соединять этот насос с водяным для первоначального выкачивания воздуха из приборов большой емкости. 6) Описываемый насос может служить для перевода газов, например, при химическом анализе, причем заменяет столь полезную, но мало удобную пипету Доейера. Для этого необходимо только конец трубки *C* загнуть и опустить в ртутную ванну с колоколом, трубку же *L* соединить с прибором, содержащим газ, и тогда при выкачивании весь газ, или только желаемую его часть, можно перевести в колокол ванны. Если сосуд *B* и трубку *C* снабдить делениями и калибровать, то можно в приборе мерять газ.[2]

Описанный ртутный насос я стану далее называть *сифонным насосом*.

После того, как я устроил этот насос, показал Физическому обществу (в апрельском заседании 1874 г.) и когда уже сделан был его рисунок, в июле узнал я от г. Гейсслера в Бонне, что г. Тёплер в Риге несколько лет тому назад устроил и описал (см. Fortschritte der Physik XVIII—59, Dingl. Journal 1862, 163—426. T. VI) ртутный насос, начало которого совершенно такое же, как в моем приборе, вся разница

---

[1] Насосы Гейсслера и Альверина требуют около 2-х пуд. ртути, так что ценность насоса со ртутью превышает 200 р. Так же быстро в начале и совершеннее под конец действует устроенный мною насос, вмещающий только $^1/_2$ пуда ртути и стоящий не более 50 руб. со ртутью.

[2] Описываемый насос может найти применение также при переводе и поднятии жидкостей, не действующих на ртуть.

в некоторых подробностях.[1] Насос, устроенный Тёплером и мною, должен, по мнению моему, при правильном устройстве, найти много применений, а потому над описанием его я и останавливался. Он может быть улучшен, если совершенно уничтожить поднятие подвижного сосуда со ртутью, заменив его действием рукоятки на поршень, не плотно притертый к неподвижному цилиндрическому сосуду со ртутью, который должен быть помещен тогда внизу. При плотном поршне его можно поместить и на одном уровне с главным резервуаром прибора. Он выйдет тогда, конечно, сложнее, но действие им будет удобнее.

В тех неоднократных случаях, когда по роду опытов необходимо было иметь возможно совершенную пустоту в больших сосудах (например, в шарах для взвешивания газов, в 15—20 литров емкости), необходимо было прибегать, для скорейшего достижения результата, к единовременному действию нескольких сперва водяных, а потом ртутных насосов. В таких сложных соединениях, какие приходится устраивать в подобных случаях, было неоцененно применение мастики для герметического соединения стеклянных трубок, насосов и приборов между собою, ибо малейший недостаток в герметичности соединения препятствует достижению пустоты и может уничтожить всю долгую предварительную работу.

§ 34

В состав большинства приборов, назначаемых для изучения газов, по необходимости входят краны, зажимы и т. п. средства, для прерывания сообщения между разными частями приборов. От качества их зависит чрезвычайно часто все достоинство некоторых наблюдений и скорость составления приборов. Так как обыкновенные средства, употребляемые для этой цели, весьма часто оказываются или недостаточными, или очень трудно достижимыми, то я считаю полезным перечислить те приемы, которые применены были мною в описываемых исследованиях для этой цели и которые оправдались практикою.

Там, где кран должен служить для сообщения или разобщения сосудов, содержащих жидкости, и где приходится приливать жидкость из одного сосуда в другой понемногу, там лучше всего употреблять каучуковые трубки, снабженные зажимами. Если дело идет о ртути, как в большинстве газовых наблюдений, то прием этот чрезвычайно удобен во всех тех случаях, где не требуется с особою точностью и при переменном давлении судить об объеме по весу влитой или вытекающей ртути. В этом последнем случае каучуковую трубку с зажимами употреблять нельзя, —по той причине, что емкость ее меняется с переменой давления. Однако и в этом случае, применяя короткие и весьма тонкие каучуковые трубки, оплетенные плотно нитяною тканью, можно при-

[1] Экземпляр этого насоса, виденный мною у г. Гейсслера в Бонне в июле 1874 г., представлял два недостатка. Отводная нисходящая трубка его широка (4—5 мм.), а потому можно ждать обратного прорыва газа. Приводная же трубка соединяется с резервуаром притертым конусом, что требует смазки салом и может вести к тому, что насос не даст манометрической пустоты. Кроме того, резервуар очень велик, а подвижный сосуд соединен с ним длинною каучуковою трубкою.

бегнуть к этому средству, если определяемые объемы сколько-либо значительны, а перемены давления не велики, ибо оплетенные тонкие трубки мало меняют свой объем при незначительной перемене давлений. Весьма важно также упомянуть о том, что каучуковые трубки, плотно оплетенные, выдерживают весьма большие давления, как это будет указано еще далее, и ими я многократно пользовался для введения ртути, воды и газов в сосуды под значительным давлением. Неоднократно такие трубки служили мне в тех случаях, где давления превышали 100 атмосфер, и в них никакого изменения после операций не замечалось. При таких больших давлениях внутренняя емкость каучуковых трубок очевидно изменялась вследствие большого увеличения внутреннего диаметра, а потому для количественных определений их применять при этом не должно, но как средство для соединения приборов они тогда оказываются драгоценными, а с зажимом они дают и способ замыкания. В случае применения каучуковых трубок, обыкновенные зажимы, находящиеся в употреблении и столь часто применяемые при химических исследованиях, оказываются с несколькими недостатками. Важнейший из них состоит в том, что винтовые зажимы при сдавливании каучука весьма легко перетирают его в том месте, где происходит сдавливание, потому что в обыкновенных зажимах нет средств для определения предела безопасного сжимания каучука. Другой недостаток обыкновенных зажимов состоит в том, что при помощи их трудно соразмерять быстроту вытекающей жидкости с потребностями опыта. Для устранения этих и других недостатков обыкновенных зажимов, я устроил зажим, изображенный на рис.V—3. На этом рисунке изображен разрез зажима в естественную его величину. *bb* представляет металлическую пластинку, прикрепляемую четырьмя винтами неподвижно, дабы сделать положение зажима совершенно определенным, причем манипуляция с ним совершается с гораздо бо́льшим удобством, чем тогда, когда зажим закрепляется только на каучуковой трубке. В этой пластинке *bb* укреплены столбики *cc*, снабженные наверху заплечиками и винтовой нарезкой. На эти заплечики накладывается поперечная пластинка, закрепляемая гайками *gg*. Так как эта пластинка может быть снята, то зажим можно надеть и после того, когда каучуковая трубка закреплена уже по своим концам. В этой верхней неподвижной пластинке *gg* движется винт с головкою *h*. Этот винт закреплен внизу в пластинке *dd*, и при движении головки *h* пластинка *d* поднимается вверх и вниз, что и служит, как в обыкновенных зажимах, для сдавливания каучуковой трубки, представленной на рисунке в сечении под буквою *a*. Для того, чтобы пластинка *dd*, при зажатии каучука, не сильно его сдавливала, а только бы служила для запора, на свободных концах ее, за столбиками *cc*, сделаны винты *jj*. [1] Перед опытом эти последние так

[1] На рисунке эти винты изображены в положении, соответствующем вмещению более толстой каучуковой трубки, чем та, которая изображена в *a*. При этой последней *j* и *j* должно ввинтить до того, чтобы концы винтов не доходили до *bb* примерно на двойную толщину стенок трубки *a*. Установка винтов *jj* сообразно толщине трубки должна быть испытана конечно пред опытом.

устанавливаются, чтобы пластинка *dd* в своем нижнем положении только что вполне запирала отверстие трубки *a*. Дальнейшее сдавливание этой трубки невозможно, потому что тогда концы винтов *ff* будут упираться в нижнюю пластинку *bb*. Если предварительно хорошо регулированы винты *ff*, то для открытия и закрытия отверстия в трубке *a* достаточно самого небольшого поворота головки *h*. Для определения же величины отверстия, образующегося в трубке, на поверхности головки *h* можно сделать деление на несколько частей. Считаю необходимым заметить, что при большинстве наблюдений правильно устроенный зажим совершенно заменяет кран и даже имеет пред ним существенное преимущество не только дешевизною, но и легкостью обращения. Описанный зажим легко сделает всякий мастер, тогда как герметически запирающий кран представляет в своем устройстве такие механические трудности, что обыкновенные, в продаже находящиеся краны никогда в действительности герметически не запирают; такие краны выделываются только весьма немногими, лучшими механиками. Это особенно касается до стальных кранов. Медные краны выделываются еще легче, чем стальные в особенности потому, что пробка крана всегда должна быть более тверда, чем самое тело крана; а потому в стальных кранах пробка закаливается, с закаленною же сталью, как известно, иногда происходит деформация, так что кран становится затем пропускающим. Еще чаще со стальными кранами встречается то обстоятельство, что пробка крана, первоначально свободно двигавшаяся в своем вместилище, затем заедает и уже перестает быть герметическою. Это совершается или тогда, когда для смазки крана употреблен спуск, не вполне чистый, и кран остается несколько времени без действия, или если верхний широкий конец пробки крана не представляет откоса, необходимого при устройстве правильного крана.

При надавливании пробки крана, устроенного без откоса, верхняя часть его задевает за острый выступ вместилища и, наконец, со временем зацепляет за неровности, находящиеся в верхней части части отверстия, вмещающего пробку. Важнее всего заметить, что обыкновенное устройство пробки крана таково, что при выделке ее на токарном станке мастеру приходится перемещать ее до окончания работы.

Дело в том, что на нижней части пробки крана необходима квадратная накладка и винт, ее плотно прижимающий, для того, чтобы пробка не могла иметь движения вверх. При выделке обыкновенных кранов сперва их обтачивают между центрами на токарном станке, при этом можно достичь действительно точной выделки крана, а потом, для того чтобы сделать отверстие и винтовую нарезку в нижней части пробки крана, необходимо закрепить эту пробку в патроне, причем центрирование теряется, и винт обыкновенно более или менее косо сидит в пробке. Чрез это он неравномерно давит на все части квадратной насадки, надевающейся на нижнюю часть пробки; а вследствие этого обстоятельства, при повертывании пробки крана, положение ее по отношению к оси отверстия меняется, от этого-то очень

часто [1] кран, правильно выточенный и пришлифованный, оказывается не герметически запирающим отверстие. Вот по этой-то причине совершенно герметически запирающие краны и выходят из рук только самых лучших мастеров. Наш известный механик г. Брауэр, а за ним и г. механик Новиков стали в настоящее время делать для меня краны иного устройства, устраняющего указанное выше неудобство выделки. Разрез такого крана представлен на рис. III—2. Пробка такого крана все время сделывается на токарном станке между центрами, что допускает наибольшую тщательность ее выделки. Это достигается тем, что винт, закрепляющий квадратную насадку пробки, нарезан снаружи на нижнем конце самой пробки, а не входит внутрь ее, как то делается обыкновенно. *AB* представляет пробку, на нижнем конце которой находится винтовая нарезка и квадратная насадка *aa*, которая и нажимается к телу крана *CD* гайкою *bb*. На концах *AB* оставляются центры, служащие при вытачивании, что позволяет весьма легко вновь центрировать пробку в случае необходимости ее поправки. На рисунке конец *D* крана устроен так, чтобы в него легко было вмастичить стеклянную трубку по способу, описанному выше (§ 30, рис. II—1). Многие из кранов указанной формы давно уже служат в моих работах и оказались несравненно лучше обыкновенных кранов, вышедших от тех же мастеров.

Во всяком случае, не только при начале работы, но и по временам во время ее необходимо испытывать всякие краны, потому что эта часть приборов легче всего подвергается порче. Притом краны требуют испытания непременно с двух сторон, потому что с одной стороны они могут держать герметически, а с другой пропускать, что замечено мною неоднократно. Испытание крана легче всего производить, вмастичив в один конец его стеклянную трубку высотою более барометрической и погрузив конец этой трубки в сосуд со ртутью. Выкачивая при открытом кране воздух из другого конца, заставляют ртуть подниматься в стеклянной трубке до возможно бо́льшей высоты и затем запирают кран, а другой конец крана соединяют с воздухом, то есть разобщают с насосом, чтобы на пробку с другой стороны действовало атмосферное давление. Заметив после того стояние барометра и стояние ртути в стеклянной трубке, оставляют эту последнюю на несколько часов, и если кран держит герметически, то высота изменится только соответственно изменению барометрического давления; а если кран пропускает, ртуть, конечно, будет постепенно падать. Затем непременно следует сделать такое же испытание с другой стороны крана.

§ 35

Металлические краны, как показывает практика, весьма легко портятся в том случае, когда входят в состав приборов, подвергающихся значительным давлениям. Это зависит от того, что самое тело крана необходимо должно быть сделано из материала, более мягкого, чем

[1] Другая причина неполной герметичности медных и железных кранов, находящихся в продаже, состоит в скважности металлов, выбираемых без особой тщательности, здесь необходимой.

пробка крана, и при движении крана эта более мягкая масса, подвергнутая в то же время значительному давлению, изменяет свою форму. Поэтому же в приборах, подвергающихся значительным давлениям, например, в 100 и больше атмосфер, должно избегать обыкновенных кранов. Для этого, кроме того, побудительною причиною служит то обстоятельство, что в состав крана всегда входит сало или спуск, служащие для его смазки, а они под влиянием сжатого воздуха, а в особенности кислорода, весьма скоро изменяются. Оттого на краях крана происходит окисление сала и его затвердевание. Это, быть может, служит одною из причин порчи крана под высоким давлением. В таких случаях винтовые или нажимные краны оказывают неоцененные услуги. Наттерер применил такой кран не только в своих исследованиях над сжимаемостью газов, но и в своих всюду распространенных приборах для получения сгущенных газов. Сущность устройства такого крана весьма проста. Это есть винт, оканчивающийся конусом, который входит в коническое отверстие сосуда, подлежащего запору. Если угол конического отверстия сосуда больше, чем угол конуса винта, и если этот последний представляет бо́льшую твердость, чем стенки отверстия сосуда, то при сколько-либо удовлетворительном центрировании обоих конусов и при некотором нажиме винта запор несомненно герметичен, а если центрирование сделано в действительности с совершенством, и разница в углах обоих конусов не велика, то даже и без нажима винта такой запор представляет все условия герметичности и не только держит пустоту, но и газы, сдавленные до 1000 атмосфер, удерживаются им в совершенстве и весьма продолжительное время. Хотя по существу своему выделка такого крана не представляет никаких трудностей (таков запор сосудов для сохранения жидкого угольного ангидрида), но дело усложняется тем обстоятельством, что в большинстве приборов, назначаемых для изучения газов, не только требуется удержать газ после нажима винта, но необходимо удерживать герметически газ под известным давлением и в то время, когда кран отперт, то есть винт отвернут. Так, например, это необходимо для того, чтобы газ, запираемый подобными нажимами, сообщить с манометром и выдержать затем некоторое время для того, чтобы давление установилось с полной одинаковостью как в сосуде, так и в манометре. Это обстоятельство усложняет устройство нажимного крана. Наттерер в записках Венской Академии описывает и дает отличный рисунок того устройства, которое он придает крану для этой цели (см. выноску на стр. 7 [= 245], § 4). Но устройство Наттерера не только сложно, но и казалось мне не вполне надежным, а потому я видоизменил его так, как изображено это на рис. IX—2. Этот рисунок изображает разрез винтового запора, примененного мною при высоких давлениях во многих приборах. Рисунок этот схематический и назначен только для того, чтобы объяснить принцип запора. Устройство затем видоизменялось, смотря по требованию прибора, и в дальнейшем изложении будут указаны видоизменения в устройстве, примененные в отдельных случаях. A изображает ту часть сосуда, в которой находится отверстие a, запираемое нажимом.

B есть сосуд, с которым *A* должен находиться в герметическом сообщении, когда *a* отперто. *c* представляет коническое отверстие, сделанное в стенке сосуда *A* и запираемое конусом *x* запирающего винта *rix* при движении ключа, надеваемого на квадратную головку *k*. Обороты винта, нарезанного на *c*, никоим образом нельзя сделать герметическими по отношению к гайке *mn* не только потому, что это механически невозможно по самому существу производства винтовых нарезок, но еще и потому, что при тугой нарезке винта не только нет возможности судить о том, когда зажим заперт плотно, но и легко испортить весь запор, потому что малейшая нечистота тогда будет препятствовать его вращению, и винт, как говорится, будет заедать. Оттого винт *i* с крупною нарезкою не должен вовсе служить для удержания газа. Для этой последней цели служат два плотных цилиндрических пояса *ff* и *ee*. Эти два пояса должны быть выделаны с большой тщательностью, равно как и двигающийся в них стержень или поршень *r*. Они должны представлять действительный цилиндр, потому что иначе герметического запора не будет, и они будут сопротивляться движению вверх и вниз винтового запора *ix*. Хотя в выделке таких цилиндрических поясов и представляются практические затруднения, но однако гг. Брауэр и Новиков достигли того, что такие пояса уже сами по себе при ширине 4—5 миллиметров доставляют герметический запор, достаточный для удержания газа под давлением в 100 и более атмосфер. Это достигается однако только при помощи весьма малой, но непременно необходимой смазки маслом цилиндра *r*, движущегося в цилиндрических поясах, упомянутых выше. Присутствие же масла не только служит поводом к погрешностям при взвешивании сосуда с газом, но и содействует тому, что поверхность цилиндра *r*, первоначально выделанная с большим совершенством, со временем становится матовою и как бы разъедается окисляющимся маслом. Заменяя масло парафином, можно устранить это обстоятельство, но я считал еще более полезным устранить при устройстве запора вредное влияние масляной смазки. Для этого между поясами *e* и *f* делается углубленный пояс *hh*, и подобное же углубление находится около конца винтовой нарезки при *gg*. В эти углубленные пояса при составлении прибора вводится ртуть, и тогда нет нужды в столь совершенной плотности пришлифовки цилиндра *r* к отверстиям *ee* и *ff* (какая необходима без применения ртути), потому что чрез те тонкие отверстия, чрез которые легко проходят масло и газ, ртуть уже может вовсе не проходить при одинаковом перевесе давлений. В этом можно убедиться непосредственным опытом. При помощи сколь возможно тонкой стеклянной трубки легко воздушным насосом вытянуть воздух из сосуда, с которым она герметически сообщена. Но если отверстие трубки действительно мало, едва видимо, то ртуть чрез нее под давлением одной атмосферы вовсе не польется. Однажды в моих опытах мне пришлось употребить трубку, столь тонкую, что чрез нее ртуть вовсе не вытекала даже под давлением двух атмосфер, хотя воздух чрез нее проходил весьма легко при разности давления в несколько сантиметров (и тогда давление уравнивалось даже по прошествии нескольких минут). Вследствие

этого, если в поясах *ef* и будут тонкие отверстия, чрез них ртуть не пойдет; а потому, когда зажим отперт, сосуды *A* и *B* будут между собою соединены герметически. Известно, что в присутствии ртути сталь в прикосновении с влажным воздухом легко окисляется, а потому при сохранении таких запоров лучше выливать из них ртуть и смазывать их парафином. Во время же самого производства опыта берется сухой воздух (или другой газ) и тогда окисления не происходит. Для испытания кранов, подобных вышеописанному, я знаю только два верных средства, а именно: взвешивание сосуда с газом, подвергнутым давлению, бо́льшему, чем то, при котором будет происходить опыт, или непосредственное наблюдение за тем, изменяется ли давление со временем, когда зажим не заперт.

§ 36

Хотя вышеупомянутые средства дают возможность герметически запирать газ, но они представляют тот недостаток, что никогда нет уверенности в том, что прибор, сперва совершенный, и со временем останется таким же, то есть будет держать так же герметически, как при испытании. А такая уверенность именно и необходима во все продолжение производства опытов, и если прибор назначен для целого ряда измерений, продолжающихся в течение месяцев, то за недостатком возможности испытания крана, всегда есть некоторое сомнение в результате, если в состав прибора входит кран. По этой причине при устройстве некоторых приборов я старался совершенно избегнуть кранов и в таких случаях герметического запирания достигал при помощи ртути. Это особенно легко в том случае, когда внутри прибора, который должно запирать, имеется давление меньше атмосферного, как например, при исследовании газов под малыми давлениями. Запирая прибор при помощи ртути, можно быть не только уверенным в том, что запор действительно герметичен, но и можно всегда в том убедиться, наблюдая положение ртути в стеклянной трубке, запирающей прибор; ибо, если прибор пропускает, положение ртути будет в ней меняться. Устройство ртутного запора притом так просто, что каждый может легко его составить. На приборе рис. VI — 1 под литерами *hik* находится изображение такого запора, причем для запирания служит капиллярная трубка *g*. Сущность устройства объясняется на эскизе рис. VII—1. Требуется сосуды *N* и *A*, снабженные трубкою *abc* или сообщать с воздухом (или с другим сосудом при помощи крана *P*) или герметически запирать, уединяя чрез то в *A* некоторое количество газа (или другой жидкости, чем ртуть). Для этой цели, трубка *ck* окружена более широкою трубкою *M*, на нижнем конце которой находится кран *Q*, сообщающийся с сосудом *Y* при помощи ли каучуковой трубки *X*, или каким-либо другим способом.[1] Если сосуд *A* был сообщен с *P* и следует пре-

[1] В последнее время я устраивал этот запор без крана *Q* и каучуковой трубки *Y*, позволяющей переменять уровень ртути в *M*, а для этой последней цели присоединял сбоку воронку *G* с краном или зажимом *k*, а зажим *l* служил для выливания, как изображено это (схематически) на рис. VI—4. Если трубка *m* длиннее барометра, то выливание ртути будет совершаться при всяком, даже очень малом давлении газа в *C*.

кратить это сообщение, то должно открыть кран Q, поднять Y до надлежащей высоты, и тогда ртуть будет входить в M; таким образом запрется отверстие в трубке ck, а следовательно и газ в сосуде A. Если затем в нем давление будет уменьшаться или в OM увеличиваться, ртуть в трубке ck будет только подыматься, не пропуская воздуха. Очевидно, что высота трубки ck должна быть соображена с разностью давлений в A и OM. Когда потребуется открыть ртутный запор, то из трубки OM сперва должно вылить столько ртути, чтоб отверстие k открылось. Для этого должно Y опустить, а кран Q открыть. Затем, чтобы удалить ртуть, оставшуюся в ck, должно в M уменьшить давление, а для этого при помощи трубки и крана P должно выкачивать из M воздух для того, чтобы в M давление было меньше, чем в A. Регулируя упругость газа в, M можно всегда достичь того, что ртуть в ck будет выше или ниже, чем в M, и тогда можно описываемый запор применять и в случае наблюдения (в A) под давлениями, бо́льшими атмосферного.

Для открытия сообщения A с P необходимо иметь в M давление, меньшее, чем в A, и вылить столько ртути, чтобы конец трубки ck стал свободен. Сосуд Y при этом может служить при поднятии и опускании для увеличения и уменьшения давления, подобно тому, как в насосе Гейсслера. Еще удобнее, чем вышеописанное, устройство ртутного запора, изображенное на рис. VI—4 в схематическом виде. Сосуд A с газом кончается капиллярною трубкою ab и при ее помощи может сообщаться или разобщаться с сосудом B, для чего ab окружена трубкою C, в которую из G можно приливать ртуть, открыв зажим k, а чрез m можно выливать ртуть, открыв зажим l. Если трубка lm длиннее барометра, при помощи самого прибора можно всегда достичь в C давления, меньшего, чем в A, потому что, прилив из G ртути и открыв кран r, мы удалим воздух (если необходимо, то под малым давлением), а закрыв r и k и выливая ртуть чрез m, мы произведем в C разрежение, необходимое для открытия отверстия ab, если в A было малое давление. Если в A будет значительное давление, трубка pk должна быть высока и тогда можно достичь прилитием ртути запора ab. Вся сущность дела здесь в том, чтобы в C *при запоре* уровень ртути был выше b, а потом давление более, чем в A; а для открытия запора сперва надо в C сделать давление меньшим, чем в A, а потом уровень ртути в C надо понизить ниже конца трубки b.

Все манипуляции с таким запором весьма просты, при самом небольшом навыке, а в особенности если для этой цели B будет сообщен с нагнетательным или вытягивающим насосом, смотря по требованию опыта, дабы легко было, при разных давлениях в A, уменьшать или увеличивать, по условиям опыта, давление в C. Однако, во всяком случае отпирание и запирание такого ртутного запора гораздо сложнее простого отпирания крана, и потому должно прибегать к такому запору только в тех крайних случаях, когда прибор назначается для точных измерений и на долгое время не может быть подвергнут испытаниям, или же в тех случаях, когда нельзя достать герметически запирающего крана.

§ 37

Полное очищение приборов, назначенных для вмещения жидкостей и газов, составляет необходимое условие для множества точных наблюдений. Это особенно касается тех случаев, когда стеклянный сосуд должен быть наполняем ртутью и в нем должно определять ее положение по отчету чрез стенки прибора. Если внутри сосуда остается хотя некоторая нечистота, а тем паче, если находятся там следы жирных веществ, часть ртути прилипает к стенкам прибора, пачкает их, отчет становится неясен, хотя бы часть стенок сосуда и была предварительно совершенно чиста, а мениск ртути не представляет той правильности, какая необходима для точного наблюдения положения ртути в приборе. Стеклянные приборы, назначаемые для вмещения газов и ртути, обыкновенно приготовляются при помощи сильного накаливания, плавления и раздувания; тогда они обыкновенно выходят очень чистыми, затем, сохраняемые без особых предосторожностей, представляют внутреннюю поверхность, весьма трудно очищаемую до желаемой степени, особенно если отверстия приборов узки, например, состоят из капиллярных трубок. После испытания разнообразных средств для скорого и точного очищения внутренности приборов, я применяю в настоящее время способ, здесь описываемый, в достоинствах которого имел случай убедиться ежедневною практикою. Если внутренняя поверхность сосуда представляет грубые нечистоты, как-то: копоть, соляные, смолистые, маслянистые вещества и т. п., а отверстие сосуда не велико, тогда прежде всего необходимо подходящими растворителями устранить эти видимые нечистоты. Для этого необходимо превратить их или в раствор, или в газообразное состояние. Крепкий раствор двухромово-калиевой соли, смешанной с серною кислотой, при продолжительном нагревании составляет средство для сожигания всяких органических веществ и даже угля, оставшегося на стенках; а потому этим путем можно, после предварительных попыток растворения, вполне удалить всякую органическую нечистоту, оставшуюся на стенках. Конечно, если это будет соляное, жирное или т. п. вещество, то употребляя щелочи, кислоты, эфир, а затем хромово-калиевую соль с серной кислотой, можно достичь этого очищения гораздо быстрее. Но во многих случаях эфир, щелочи и т. п. растворители мало помогают делу, а смесь двухромово-калиевой соли с серною кислотой действует почти всегда хорошо. Когда видимая нечистота уничтожена, тогда начинается собственно промывка, назначаемая для полного очищения. Самый механизм промывки сосуда затрудняется только в том случае, когда отверстие, ведущее в сосуд, представляет капиллярную трубку. В таком случае, однако весьма обыкновенном, другое отверстие, если оно имеется в сосуде, сообщается с насосом, а капиллярная трубка погружается в жидкость, назначаемую для промывания, а эта последняя, при выкачивании воздуха, втягивается до желаемой высоты в прибор, нагревается или оставляется на некоторое время и затем, при разобщении с насосом, выливается из сосуда. Когда имеется одно отверстие в сосуде,

тогда самое наполнение прибора жидкостью чрез тонкое отверстие становится весьма затруднительным, и по этой одной причине лучше всего так направлять устройство приборов, чтобы каждый прибор имел или одно широкое отверстие, или два, когда необходимы капиллярные трубки. Все почти мною устраиваемые приборы именно построены на этом основании, хотя маловажном по существу дела, но в практическом выполнении чрезвычайно существенном, потому что очищение прибора есть операция, которой никаким образом нельзя избежать в точных опытах. Два отверстия, кроме того, облегчают все дальнейшие наполнения прибора; а потому в большинстве случаев и можно с удобством применять этот способ устройства приборов. В тех случаях, когда в приборе есть только одно тонкое трубчатое отверстие, наполнение прибора промывною жидкостью должно производить, вправив трубку прибора в колбу с промывною жидкостью, выкачивая затем из колбы воздух и потом впуская его вновь. При этом жидкость входит в прибор и таким же образом из него выливается. Иногда полезно в подобных случаях применять способ, сходный с тем, какой будет описан в следующей главе для наполнения барометров ртутью и который изображен на рис. VII—4.

Для очищения сосудов промывание производится последовательно жидкостями, друг друга растворяющими, с тем, чтобы последняя жидкость, остающаяся в приборе, легко удалялась испарением и не давала при этом никакого остатка. Все употребленные для промывания жидкости не должны содержать следов пыли, мути и т. п. порошковатых тел, ибо они затем весьма трудно удаляются.

В прежнее время для этой цели я чаще всего применял следующий порядок жидкостей: едкое кали, азотная кислота, вода, спирт, эфир. Ныне считаю гораздо более верным исключить эфир, потому что тщательное очищение эфира и особенно совершенное удаление тех трудно летучих продуктов, которые составляют подмесь эфира, весьма затруднительно и требует очень долгого времени, тогда как пары чистого спирта удаляются под конец операции с бо́льшею легкостью, и чистый спирт легко получается в торговле. Поэтому, употребляемый мною порядок жидкостей есть следующий: крепкий нагретый раствор двухромово-калиевой соли в смеси с серною кислотою, затем азотная кислота, разбавленная значительным количеством воды, потом чистая вода, промывание которою следует производить до тех пор, пока чувствительная лакмусовая бумага не будет окрашиваться промывною водою. Затем следует крепкий спирт, промывание которым следует повторить несколько раз. Под конец производится продувание сухим воздухом для удаления паров спирта. Если при этом возможно нагревать прибор, то нагревание значительно ускорит как самую промывку, так в особенности последнее высушивание прибора, т. е. удаление паров. Азотная кислота во многих случаях, если прибор был предварительно довольно чист, может быть исключена. Когда требуется иметь прибор, совершенно сухой, то необходимо после продувания воздухом соединить прибор с воздушным насосом, выкачать воздух, впустить затем понемногу тщательно высушенный воздух и, повторив эту опе-

рацию несколько раз, можно быть уверенным в достаточной сухости стенок, в особенности если при выкачивании они будут подогреваться. Когда прибор таким образом тщательно очищен, тогда необходимо заботиться о том, чтобы во время присоединения новых частей аппарата в прибор не попали нечистоты вместе с входящим воздухом. Затыкая прибор чистою ватою, можно предохранить от пыли внутренность прибора на довольно долгое время.

Что касается до свойств вышеописанным путем свежеочищенной и высушенной внутренней поверхности сосудов, то они выражаются в явлениях прикосновения с жидкостями. Вода такую поверхность хорошо смачивает. Если поверхность сколько-нибудь нечиста, то на месте прикосновения воды к стенке сосуда при рассматривании в лупу замечаются неровности и отсутствие полного смачивания. Если же поверхность совершенно чиста, то смачивающий слой касается к поверхности сосуда в виде прямой линии, соответствующей изгибу прибора, и на этой линии не замечается неровностей, характеризующих прикосновение воды к нечистому сосуду. Эти явления в особенности заметны тогда, когда вода наполняет сосуд снизу. Прикосновение ртути к хорошо очищенным стенкам стекла характеризуется опять тем, что место прикосновения ртути к стенке сосуда представляет прямую линию, а не ломаную, какую представляет оно в случае нечистоты стенок. Если внутренние стенки сосуда хорошо очищены и затем находятся в прикосновении только с газами, не содержащими пыли, то поверхность остается с первоначальными качествами, то-есть место прикосновения представляется весьма близким к прямой линии. Но если в воздухе находится пыль, или ртуть покроется окислами, тогда место прикосновения представляет, в особенности при падении уровня ртути, весьма неправильные изгибы. Этот признак до такой степени ясен, что им пользовался я всегда при суждении о том, представляет ли очищенная поверхность надлежащую степень совершенства.

Можно было бы думать, судя по известным данным, что о свойстве поверхности и о степени чистоты стекла получается точное суждение по определению угла встречи между ртутью и стеклом. Действительно некоторые писатели утверждают, что угол встречи ртути со стеклом постоянен при разных диаметрах, если ртуть одна и та же. Так Лаплас его принял за 43°12′, Пуассон, из данных Гей-Люссака, нашел его равным 45°30′; а Десень [1] из всех данных Данжера вывел, что у него угол встречи равняется 37°52′33″. Но вышеуказанное допущение постоянного угла встречи положительно неверно. Прямые наблюдения с одной и той же ртутью и одной и той же трубкою легко покажут каждому, что угол встречи, а вследствие того и высота мениска могут весьма значительно разнообразиться, смотря по тому, приливается ли ртуть, или отливается, то есть уровень жидкости в сосуде повышается или понижается. В первом случае угол встречи всегда будет меньше (считая, как и должно, угол между нормалью к мениску на месте прикосновения к стенкам и нормалью к поверхности сосуда),

[1] Annales de Chimie et de Physique (3) LI—436.

чем во втором, и разница эта может достичь до весьма значительной величины, а особенно в том случае, когда ртуть нечиста, например, когда она была кипячена в присутствии воздуха и содержит в своем растворе окислы. При понижении уровня ртути угол может выйти даже более прямого, то-есть может получиться вогнутый мениск, как это замечается во многих случаях в узких барометрических трубках, излишне долго кипяченных без особых предосторожностей. Разноречие между прямым наблюдением и выводом из расчета геометров, упомянутых выше, зависит от двух причин: во 1-х от того, что во многих из рассмотренных этими геометрами наблюдений, при замене одного угла встречи другим, получаются при расчете депрессии и высоты менисков, столь близкие, что замечаемые разности находятся в пределах погрешности наблюдений, как это можно судить по странице 439 и 440 мемуара Десеня, где он определяет, какие получатся емкости менисков при замене угла встречи, определенного им, тем углом (43°12′), который нашел Лаплас; а во 2-х от того, что наблюдатели, данными которых пользовались упомянутые геометры, стремились производить свои опыты приблизительно в одинаковых условиях, то есть или при приливании или при отливании ртути, или после встряхивания сосудов, когда высоты менисков приобретают большую степень постоянства. Непостоянство депрессии при одних и тех же трубках столь легко наблюдать, что каждый может убедиться в том, а потому нельзя, как я думал первоначально, руководствоваться определением угла встречи чистой ртути к стеклу при суждении о степени чистоты поверхности, прикасающейся к ртути.

§ 38

Между веществами, употребляемыми для сушения газов, только два представляют действительные практические удобства при совершенстве результата, достигаемого при их помощи, именно: серная кислота и фосфорный ангидрид. Прямые опыты, многократно произведенные мною, показывают, что высушивание воздуха одним хлористым кальцием никогда не совершенно, сколь бы длинен не был слой этого вещества, в особенности если взять хлористый кальций, не содержащий окиси кальция, а следовательно содержащий еще воду, то-есть рыхлый, такой, какой берется для органического анализа. Пемза, смоченная крепкою серною кислотою, представляет, при длине пути, в 5 раз меньшей, чем путь чрез хлористый кальций, одинаковую с ним высушивающую способность; а фосфорный ангидрид в этом отношении, как общеизвестно, представляет самое надежное средство для высушивания и при сравнительно малом слое дает верный результат. Так как в моих опытах весьма часто необходимо иметь совершенно высушенный газ, и притом весьма полезно по возможности сократить место, занимаемое сушилом, то я и устраиваю его обыкновенно в том виде, как изображено на рис. VI—1, n VII—4, *K*, рис. III—1. На этом последнем рисунке видно устройство сушила в подробности. Две или несколько *U*-образных трубок *gg* устраиваются так, чтобы одна

была последовательно более другой, и таким образом несколько трубок укрепляются на одной доске. Они между собою взаимно соединяются так, чтобы ток газа последовательно проходил чрез каждую из этих трубок, как видно на рис. III—1. Внутри такой системы трубок, наполненных пемзой, смоченной серной кислотой, помещается цилиндр, запаянный с одного конца и наполненный внизу стеклом, затем асбестом, а потом смесью асбеста с фосфорным ангидридом, потом опять волокнистым асбестом и стеклом. До дна этой трубки *hh* доходит трубка, отводящая газ прибора, а чрез верхнее отверстие трубки проходит короткая загнутая трубка, соединяющая эту трубку с первою *U*-образною трубкою, содержащею пемзу и серную кислоту.[1] Как серная кислота, так фосфорный ангидрид, пемза и асбест пред употреблением в дело должны подвергнуться обработке для того, чтобы чрез них не взошло вместе с газом некоторых подмесей. Действительно, серная кислота, находящаяся в продаже, содержит хлористый водород и другие газообразные вещества, а потому дает их подмесь в газе. Вследствие этого для сушения необходимо применять только совершенно чистую серную кислоту. Фосфорный ангидрид, по способу его приготовления, нередко содержит в себе не только фосфористый ангидрид, но и самый фосфор; а эти последние летучи, и вследствие того пары их могут переходить вместе с газами. Поэтому необходимо пред употреблением сушила пропускать чрез него долгое время предварительно высушенный воздух для того, чтобы окислить фосфор и фосфористый ангидрид. Пемза и асбест представляют в своем сложном составе содержание фтористых соединений, и при действии на них кислот, особенно серной, выделяется некоторое количество фтористого кремния. А потому пред употреблением необходимо вываривать эти вещества в крепкой серной кислоте, затем промыть водою, высушить и только тогда употребить для составления сушила, иначе в газе может содержаться подмесь фтористого кремния, как об этом можно судить даже непосредственно по запаху газа, пропущенного чрез сушило с серною кислотою и пемзою, не подвергшеюся предварительному очищению.

В большинстве случаев сушило с серной кислотой не оказывает влияния на ход наблюдений, хотя давление газа по обе стороны сушила будет не одинаково, вследствие сопротивления слоя жидкой серной кислоты. В тех же случаях, когда необходимо, чтобы давление было в действительности одинаково по обе стороны сушила, серную кислоту необходимо исключить и заменить ее хлористым кальцием и фосфорным ангидридом. Хлористый кальций будет служить в этом случае только для предварительного сушения.

При медленном пропускании газа чрез сушило, описанное выше и представляющее длину пути не более двух метров, можно быть уверенным в совершенной сухости, если даже в течение 5 минут проходит

[1] На рис. III—1 ошибочно представлено, что трубка, идущая от крана *R*, находящаяся при приборе, кончается в трубке *g* с серною кислотою. В действительности эта трубка, проводящая газ в прибор, доходит до центральной трубки, идущей к фосфорному ангидриду, чтобы наружный воздух проходил сперва чрез пемзу (или хлористый кальций), а потом чрез фосфорный ангидрид.

по литру газа. При быстром токе газа конечно для полного сушения необходимо сушило с более длинным путем. Такого рода аппараты для сушения применены мною при получении газов, назначенных для сжимания, и они будут описаны при дальнейшем изложении опытов этого рода.

§ 39

При производстве опытов с газами, при устройстве барометров и во множестве других физических исследований, необходима совершенно чистая ртуть. Разнообразные способы, употребляемые для этой цели, представляют множество недостатков, но особенно неудачным кажется мне применение раствора дву-трех-хлористого железа для очищения ртути, как показывает опыт. Ртуть, очищенная этим путем, затем весьма трудно высушивается и при высушивании дает, даже в безвоздушном пространстве, пленку с пятнами, содержащими хлор, что указывает на образование каломели от действия ртути или окислов ртути на дву-трех-хлористое железо и на растворение некоторого количества хлористых соединений во ртути. Наблюдения, сделанные в этом отношении моим другом и помощником г. А. Шмидтом, заставляют притти к высказанному заключению. Конечно, когда идет дело об очищении весьма нечистой ртути, бывшей в употреблении, тогда можно применять и этот способ; но действительно чистой ртути, такой, которая не изменялась бы на воздухе или, по крайней мере, изменялась бы чрезвычайно медленно и представляла бы долгое время поверхность, совершенно чистую, этим путем получить положительно невозможно. Лучше других из обыкновенных способов — очищение ртути взбалтыванием с крепкою серной кислотой, тем больше, что этим путем можно достичь сразу и высушивания ртути. Это особенно важно потому, что при высушивании ртути нагреванием ее на воздухе, ртуть, бывшая в хорошем состоянии, становится повидимому всегда (то-есть как бы ни была очищена) негодною к употреблению, вследствие того, что, хотя медленно и слабо, окисляется, и часть окислов, вероятно какой-нибудь низшей степени окисления, растворяется в самой ртути. Затем такая ртуть пачкает со временем стенки чистых приборов и уже не дает хороших результатов при наблюдении. Те затруднения, которые встречаются при очищении ртути, не устраняются вовсе перегонкою ртути без особых предосторожностей, а именно на воздухе, потому что при этом ртуть точно также окисляется и получает способность со временем мазаться и пачкать стенки приборов. Тем важнее метода, предложенная для очищения ртути Вейнгольдом в 1873 году. Описание его прибора, устроенного в моей лаборатории г. Шмидтом, находится в Carl's Repertorium für experimental Physik T. IX. Прибор этот действует таким образом, что в нем перегонка совершается в стеклянном сосуде и безвоздушном пространстве; притом насосом Шпренгеля, видоизмененным Вейнгольдом, можно во всякое время удалить те газообразные вещества, которые накопляются со временем в барометрической пустоте. Могу засвидетельствовать по опыту перегонки многих пудов ртути, что действие прибора Вейнгольда совершенно во всех

отношениях и что ртуть, очищенная им, представляет при производстве точных наблюдений неоцененные преимущества пред ртутью, очищенною другими способами. Она даже имеет вид иной, чем ртуть, сколько либо нечистая. Необходимо однако заметить, что раз очищенная ртуть не должна быть затем нагреваема на воздухе, иначе она приобретает опять способность мазаться и портить приборы.[1] Барометры, устроенные при помощи ртути, перегнанной в безвоздушном пространстве, можно безопасно нагревать, но только тогда, когда уже почти совершенная пустота существует в том пространстве, среди которого происходит нагревание ртути. Для уверенности в том, что ртуть, перегнанная в приборе Вейнгольда, при ее собирании и сохранении не подвергается порче от прикосновения с воздухом, лучше всего поступать таким образом, чтобы в приемнике, назначенном для собирания ртути, производилось также безвоздушное пространство, и после того, как прибор наполнился ртутью, он запаивался так, чтобы над поверхностью ртути не оставалось воздуха, то есть в почти совершенной пустоте. Важное удобство очищения ртути по способу Вейнгольда состоит между прочим в том, что тщательно собранная ртуть сразу уже не только очищена от нелетучих подмесей, но и высушена, то есть очищена от подмесей, более ее летучих. Сохранение такой ртути очевидно должно быть такого рода, чтобы при этом не поглотилось ртутью влажности, для чего недостаточно одного запирания пробкою, а необходимо или заливание мастикою, или хранение под колоколом, содержащим высушивающие вещества.

Меня интересовал не раз вопрос о том, какого рода подмеси придают ртути тот вид нечистого металла и ту мутную, не блестящую поверхность, какая характеризует нечистую, пачкающую (стенки сосудов) ртуть. Не подлежит сомнению для меня, что при полном отсутствии посторонних металлов, открываемых химическими реагентами, ртуть может обладать этим свойством. Ртуть, очищенная трех-хлористым железом и не содержащая посторонних металлов, представляет, однако, все признаки весьма нечистой ртути. В этом случае причина несомненно лежит в том, что во ртути растворяется какое-то хлористое соединение ее, выделяющееся при нагревании. В других же случаях, на основании некоторых наблюдений, я полагаю, что причину нечистоты составляют окислы ртути, способные в некотором количестве в ней растворяться. Какая это степень окисления ртути, этого, конечно, сказать нельзя; но, может быть, эта степень окисления подобна той квадрантной окиси (то есть имеющей состав R^4O), которую дает серебро или, может быть, это просто закись ртути. Известно, что медь в расплавленном виде способна растворять окислы меди; известно, что серебро в расплавленном виде растворяет некоторое количество кислорода. В меди кислород, наверное, находится в виде низшей степени окисления меди, а в расплавленном серебре в неопределенном виде. Если бы подмесь ртути, придающая ей нечистоту, состояла в раство-

[1] Она также не должна прикасаться к чугуну и железу — тогда всегда замечается пачкание ртути.

ренном газе, то тогда, надо думать, этот газ выделялся бы в безвоздушном пространстве и при нагревании; но этого именно нет. Ртуть, имеющая признаки нечистоты, становится еще хуже и еще грязнее после нагревания. Вследствие этих наблюдений мне кажется наиболее вероятным, что нечистота ртути главным образом зависит от того, что ртуть дает окисел, растворяющийся в металле. Когда кипятят ртуть, вполне чистую, и без доступа воздуха, около стенок прибора всегда замечается образование пузырьков газа, хотя бы первоначальное наполнение ртути было таково, что газа нисколько не осталось бы. Если бы это был газ, прилипнувший к поверхности сосуда, то после наполнения сосуда в безвоздушном пространстве пузырьков не должно бы образоваться; но они и тогда происходят в значительном количестве и после охлаждения (если не выделились при кипячении) они остаются в виде пузырьков постоянного газа, следовательно, они образуются из ртути, а следовательно во ртути находится или растворенный газ, или химически с ней соединенный. Что газ этот не есть растворенный воздух, тому доказательством служат те обстоятельства, которые приведены в начале следующей главы, а также и то, что ртуть, при кипячении дающая пузыри газа в безвоздушном пространстве, при обыкновенной температуре не выделяет никаких следов газа. Для меня вероятнее всего кажется допустить, что во ртути обыкновенно находится часть газа в химическом соединении, что выделение газа при нагревании зависит от содержания кислородного соединения, диссоциирующего (то есть частию разлагающегося) при нагревании и постоянного при обыкновенной температуре. Затруднение в полном решении представляющегося вопроса состоит именно в том, что ртуть, перегнанная в безвоздушном пространстве, собранная также в сосуде, не содержащем воздуха и по возможности других газов, такая ртуть все-таки при нагревании дает хотя малое количество пузырьков газа. Для этого, однако, требуется значительное нагревание; не только при обыкновенной температуре, но даже и при 100° такая ртуть никаких пузырей газа не дает. Кипячение такой ртути несравненно легче, чем кипячение менее чистой ртути, и такая ртуть притом вовсе не способна пачкать чистой поверхности стекла даже после годичного употребления. Это показывает, что при обыкновенной температуре окисел, растворяющийся во ртути, не образуется, но что при возвышенной температуре, хотя он и разлагается отчасти, но при ней же он и происходит, подобно тому, как это, например, замечается при образовании окиси ртути, при образовании водородистого калия и т. п. соединений металлов с газами. Весьма было бы полезно для точных наблюдений вполне решить представляющиеся здесь вопросы, на которых мне пришлось остановиться только вскользь, по пути, при исследованиях.

Сентябрь 1874. С.-Петербург.

Четвертая глава

О ртутных барометрах и манометрах для малых давлений

§ 40

Барометр необходимо применять постоянно при исследовании упругости газов. Когда приходится делать наблюдения над упругостью в открытом манометре, тогда необходимо знать атмосферное давление при помощи барометра, а манометр покажет только разность давлений газа, находящегося в приборе, и давления атмосферы. Все наблюдатели до сих пор, а вслед за ними и я в начале своих наблюдений, этим способом и производили определение упругости газов. Тогда вкрадывается в результат двойная погрешность: одна, зависящая от неточности наблюдений барометрической высоты, а другая — от неточности наблюдений манометрической высоты, так как искомая величина есть сумма этих двух. Вследствие этого, в последнее время во всех случаях, где только возможно, я старался уничтожить открытые манометры и заменить их непосредственно бароманометром, то есть закрытым манометром с торичеллиевою пустотою наверху для того, чтобы иметь давление непосредственно чрез определение одной манометрической высоты. Такие бароманометры необходимо устраивать точно так же, как и самые барометры, а потому в дальнейшем описании речь будет итти исключительно об устройстве одних барометров. Точно таким же путем устраивались мною короткие закрытые манометры. Те небольшие отличия, которые достойны описания, будут приведены в конце этой главы.

При устройстве барометров не представляется других затруднений, кроме одного наполнения барометрической трубки ртутью. Но это последнее — самая существенная операция в приготовлении барометров — представляет такие практические трудности, если желательно достичь некоторого совершенства, что литература этого предмета, как должно быть известно моим читателям, весьма богата. Ежегодно появляются предложения различных способов для выполнения этой операции. Каждый механик, каждая метеорологическая обсерватория имеют для того свои специальные способы. Некоторые из них описаны и многие были перепробованы мною тогда, когда первые попытки простейшего приготовления оказались мало удовлетворительными. Не стану входить здесь в оценку различных методов наполнения барометров, но укажу только на то, что наилучший способ из многих, испытанных мною и предложенных другими физиками, есть

способ Уэлча (Welsh Philosophical transactions 1856.—147. p. 507). В нем есть только два недостатка, а именно ломкость прибора — но это еще не важно, и отпаивание стеклянной трубки в безвоздушном пространстве. Этот последний недостаток коренной, и способы, основанные на подобном приеме, должны быть оставлены, потому что непосредственные опыты показали мне многократно, что при накаливании стекла в совершенно безвоздушном пространстве появляется газ. Откуда он берется, я не могу объяснить и не делал на то попыток. Передаю только факт, в котором может каждый легко убедиться. Возьмем возможно совершенный барометр с капиллярною трубкою наверху, и пусть в таком барометре при поднятии уровня ртути выполняется вся пустота ртутью или замечается при данной емкости пустоты малая упругость h. Опустив уровень ртути, то есть произведя наверху торичеллиеву пустоту, нагреем теперь стекло капиллярной трубки до размягчения так, чтобы часть стекла сплавилась и емкость пустоты немного чрез то уменьшилась, а затем после охлаждения заставим опять подниматься ртуть в пустоту, повышая нижний ее уровень. Тогда заметим, что пустота уже несовершенна и что в ней явилось некоторое количество газа, а если первоначально при некотором объеме пустоты в ней была упругость h, то теперь она будет больше прежней. Если барометр был пуст, то выделившийся газ можно заметить теперь, потому что при поднятии уровня ртути газ будет занимать верхнюю часть капиллярной трубки.[1]

---

[1] Не зависит ли это явление от диссоционного разложения стекла в безвоздушном пространстве при высокой температуре? Высокая температура есть одно из условий диссоционного разложения; пониженное давление есть другое такое условие. Здесь они оба соединены, и может быть такие тела, как стекло, не разлагаясь при одном повышении температуры, разлагаются при соединенном действии высокой температуры и низкого давления. Впрочем, дело может быть гораздо проще. Может быть, этот появляющийся газ есть не что иное, как газ, отделяющийся от поверхности при накаливании. Убеждение в существовании описанного явления я получил тогда, когда устраивал барометр, изображенный на рис. IV—4. Этот барометр был наполнен следующим образом: верхний конец трубки *HE* был снабжен четырьмя стеклянными шарами емкостью каждый около 60 куб. сантиметров. Шары разделялись между собою такими перехватами, которые легко было запаять одним прикосновением пламени паяльной трубки. Сперва чрез верхнее отверстие четвертого шара в приборе производилась манометрическая (§ 32) пустота, потом чрез *B* способом, далее описываемым, при помощи тонкой оттянутой стеклянной трубки, вливалась чистая ртуть. Когда она наполнила не только трубку *B*, но и всю трубку *HE* и все четыре шара, находящиеся наверху до последнего верхнего перехвата, тогда этот перехват запаивался. Не упоминаю о том, что предварительно пред тем вся барометрическая трубка была нагрета и высушена, как следует для приготовления точных барометров. После того из прибора чрез кран *L* рис. IV—5 ртуть выливалась так, чтобы она упала до самого низкого стояния, притом стенки пустоты нагревались для того, чтобы отделить в пустоте все газы, могущие пристать к стенкам, и после остывания опять прибавлялась ртуть чрез *J* до тех пор, чтобы три наверху находящиеся шарика наполнились ртутью, и тогда четвертый шарик отпаивался. Операция затем опять производилась точно так же, притом последовательно отпаивались второй и последний шарики. Мой расчет состоял в том, что при этом способе приготовления с самого начала уже оставляется ничтожно малая масса газа в пустоте. Затем, при отпаивании первого шарика эта малая масса газа еще уменьшается во столько раз, во сколько емкость шарика превосходит емкость шейки, остающейся при отпаивании, а так как при отпаивании в шарике

Для того, чтобы передать читателю в надлежащей последовательности различные попытки, сделанные мною для получения возможно совершенных барометров, я первоначально перечислю все те более или менее новые приемы для наполнения барометров, которые мною испытаны, прежде чем я дошел до того способа наполнения барометров, которого держусь в настоящее время, а потом изложу те результаты, которые извлек из своей практики в этом деле. В течение 1872, 73 и 74-го годов я наполнил и испытал, частью при помощи М. Л. Кирпичева, по крайней мере 20 барометров и манометров, причем применены были различные системы наполнения.

Первое, что представляется при чтении литературы, относящейся к этому предмету, это есть наполнение барометров кипячением ртути. Так как наблюдение показало мне справедливость общераспространенного мнения о том, что в присутствии воздуха ртуть при нагревании портится, то очевидно было желать произвести кипячение без доступа воздуха.

Желая первоначально испытать кипячение под обыкновенным давлением, я применил для этой цели следующий простой прием. Трубка, назначенная для барометра, была на открытом конце вытянута и загнута. Такая трубка наполнялась чистою и сухою ртутью с известными предосторожностями, то есть так, чтобы около стенок не оставалось по возможности воздушных пузырьков. Когда трубка была вся наполнена, открытый и загнутый конец ее погружался в чашку со ртутью и затем запаянный конец ее опускался ниже этой чашки со ртутью так, чтобы трубка была в наклонном положении к горизонту во время кипячения. Оно производилось на обыкновенной газовой печке, употребляемой для органического анализа. Такая печь представляет все удобства для последовательного и равномерного кипячения. Сперва нагревался верхний конец трубки, ближайший к загнутому концу, и когда он прокипел, зажигались рожки далее и далее вплоть до запаянного конца трубки, причем и остальная часть трубки поддерживалась при температуре, близкой к кипению, так что пузыри паров и газов, выделяющиеся из ртути, восходили до загнутого конца трубки. Когда первое кипячение было кончено, тогда в загибе трубки, по охлаждении, оказался воздух, выделившийся во время кипячения. Трубка перевертывалась, опять доливалась ртутью и кипячение было возобновлено в том же порядке до тех пор, пока при новом кипячении не скоплялись в загибе газовые пузырьки, а выделялись только пары ртути. При образовании паров ртути часть ее выбрасы-

---

оставалось никак не более $^1/_{10}$ доли куб. сантиметра газа, то разрежение, которого можно этим путем было достигнуть после отпаивания четырех шаров, должно бы быть неизмеримо ничтожным. Я думал тогда, что этим путем можно приготовить вполне, в пределах погрешностей наблюдения, безвоздушные барометры. Действительно, барометр вышел с поправкою, ничтожно малою (0,034 мм.), но все-таки поправка в нем была, то есть пустота была не абсолютная, и причину этого нельзя искать в чем-либо другом, как в том, что при отпаивании выделяется газ. Затем был произведен непосредственно опыт для определения того, выделяется ли газ при отпаивании, и он-то именно и убедил меня окончательно в существовании констатируемого здесь факта.

валась из трубки; но так как загнутый конец трубки погружен был в чашку со ртутью, то воздух при этом не врывался в трубку, а она все время оставалась наполненной ртутью. Это составляет удобство описываемого способа, дающего притом возможность судить о полном освобождении ртути от газовых пузырьков. Решившись испытать этот способ до конца, я, при помощи лаборанта г. Пратца, должен был подвергнуть одну из трубок кипячению шесть раз, потому что даже после пятого кипячения из ртути еще выделялись пузырьки воздуха и притом, после кипения тех частей ртути, которые были близки к запаянному концу трубки, оставались и по охлаждении еще мелкие пузыри газа. Только после шестого кипячения ни около запаянного конца, ни в загибе близ открытого конца не оказалось газовых пузырьков и я считал, что кипячение достигло вполне своего надлежащего конца. Барометр, полученный этим путем, действительно оказался вполне абсолютно пустым. В этом убедился я общеизвестным способом, состоящим в том, что уровень ртути в барометре поднимался так, чтобы емкость пустоты значительно менялась. Практика подобного рода сравнений будет описана далее, а теперь по отношению к барометру, приготовленному описанным путем, замечу следующее: вся внутренняя поверхность трубки этого барометра оказалась покрытою серым порошком вещества такого, что ртуть стала уже прилипать к стенкам, и при падении уровня образовывался не только плоский, но даже вогнутый мениск ртути. Обстоятельство это принудило меня пользоваться при наблюдении этим барометром только такими данными, при которых ртуть восходила в барометрической трубке. Устройство моих барометров, описываемое далее, позволяет пред каждым наблюдением легко достичь того, чтобы мениск образовался при восхождении ртути, и следовательно это обстоятельство не могло препятствовать точности наблюдений, но ей препятствовала нечистота стенок барометрической трубки, ибо изображение мениска не представлялось уже при увеличении катетометрическою трубкою вполне отчетливым и чрез то не было уверенности в отчете до 0,03 мм. Если к этому прибавить то обстоятельство, что при нечистоте внутренних стенок барометрической трубки мениск получался всегда высотою гораздо меньше, чем в открытой ветви барометра, а потому требовалась поправка на капиллярную депрессию, не одинаковую в обеих ветвях барометра, то всю погрешность наблюдения при барометрической трубке, приготовленной описанным путем, нельзя считать меньшею, чем 0,06 мм. Внутренний диаметр описываемого барометра был равен 14,2 мм. Итак: если довести кипячение барометра до конца, то есть до того, чтобы из ртути не выделялось больше пузырьков газа, то ртуть и стенки барометра приходят в состояние, негодное для точного наблюдения.

§ 41

При описанном способе кипячения является то важное неудобство, что во время кипения выбрасывается много ртути из трубки и она в горячем состоянии приходит в чашке, подставленной под загнутым концом трубки, в прикосновение с воздухом, окисляется при этом и об-

ратно входит в окисленном состоянии. Чтобы устранить это неудобство, я видоизменил описываемый способ таким образом, что загнутый конец трубки делал длинным, длиною более 800 мм., так чтобы, при наклонном положении самой барометрической трубки, загнутый конец ее был в вертикальном положении и представлял сам по себе барометр. Таким образом, получалась пустота в верхней части открытого конца, и в эту пустоту выделялись пары и воздух из самой барометрической трубки во время ее кипения. Кипячение при этом облегчилось, горячая ртуть не выбрасывалась уже в чашку, но явились другие неудобства, и важно было то обстоятельство, что выброшенная во время кипения ртуть уже не возвращалась обратно в трубку, так что в самой барометрической трубке количество ртути во время кипения значительно уменьшалось. Сверх того, все манипуляции с прибором этого рода оказались менее удобными, и если этот прием применять, то, мне кажется, его следует применять вовсе без всякого кипячения, а именно: на холоду образовать пустоту в загнутом колене, затем, замастичив нижний открытый конец трубки, эту пустоту провести чрез весь барометр и чрез то поглотить в нее осевшие остатки влаги и воздуха, оставшиеся на внутренних стенках барометрической трубки. Применяя при этом слабое нагревание, но не до кипячения, можно достичь хороших результатов, хотя один опыт, сделанный мною в этом отношении, не мог быть случайно доведен до конца, потому что трубка прежде того лопнула. Другой барометр, приготовленный этим путем, после кипячения, оказался лучше описанного выше относительно свойств внутренней поверхности трубки. Необходимо однако заметить, что опыты с кипяченными барометрами были произведены мною в то время, когда я еще не имел тщательно очищенной в приборе Вейнгольда ртути, и, может быть, при помощи ее был бы достигнут лучший результат.

Как бы то ни было, несколько попыток с кипяченными барометрами показали мне, как и другим наблюдателям, что прокипяченные барометры, если кипячение доведено до конца, представляют весьма важные, едва ли устранимые неудобства нечистоты поверхности стекла и ртути внутри трубки. Вследствие этого я совершенно оставил приемы приготовления, основанные на кипячении, и перешел к тем, в которых наполнение производилось хотя бы и нагретою ртутью, но без кипячения. Важнейшее достоинство таких способов состоит в том, что при них весьма легко получаются барометры с совершенно чистыми поверхностями как стекла, так и самой ртути, и это составляет неоцененное достоинство для ясности и точности отсчитывания положения ртути. При наполнении барометров без кипячения представляется два повода к сомнению в абсолютности получаемого результата. Во-первых, можно думать, что на поверхности стекла остается часть сгущенного воздуха и влажности; а во-вторых, можно предполагать, что ртуть растворяет газы и затем испаряет их в пустоту. Что-касается до первого обстоятельства, то оно несомненно устранимо, потому что пред наполнением трубки ртутью, ее можно весьма сильно прокалить, произведя в ней возможное разрежение ртутным насосом. При этом,

надо думать, последние следы влаги и воздуха удалятся, в особенности если после этого наполнить трубку сухим водородом, выкачать его и вновь после того совершить прокаливание и выкачивание до возможной пустоты. Заменяя воздух водородом, я имел в виду наблюдение, сделанное мною несколько лет тому назад и состоящее в том, что после прокаливания и охлаждения в безвоздушном пространстве стекло хорошо смачивается водою, а если же будет охлаждено в воздухе, то смачивается гораздо менее совершенно; вода не расплывается на таком стекле. Если же охлаждение произвести в атмосфере водорода, то смачивание столь же хорошо, как и после охлаждения в пустоте. Можно думать поэтому, что водород, подобно металлам, не пристает к стеклу и не сгущается на его поверхности. По этой то причине, заменяя воздух водородом, я и думал достичь того, чтобы этим путем удалить последние следы веществ, могущих оставаться на поверхности стекла. Что же касается до растворения газов во ртути, то в этом отношении нет ни одного сколько-либо точно обставленного показания. Есть, напротив того, многие факты, которые нельзя согласить с мыслью о том, что ртуть способна растворять воздухообразные вещества, так, например, в моем распоряжении находится несколько манометров, не вполне совершенных, заключающих небольшое количество воздуха в запертом конце. Количество воздуха, находящегося в манометрах, в течение нескольких лет не убавляется и не прибавляется заметным образом, судя по измерениям, сделанным в вытянутом и запаянном конце этих манометров. Если бы ртуть растворяла составные части воздуха и выделяла их в пустоту, то обыкновенные манометры со временем портились бы и стали бы заключать воздух, чего вовсе не замечается. Так у меня есть один манометр, выверенный мною с возможною точностью в 1859-м году и с тех пор постоянно находящийся в употреблении, подвергавшийся перевозке и однажды в течение шести месяцев бывший в пустоте; а между тем, он и по сих пор представляет такую же, почти совершенно абсолютную точность показаний, какую он имел и в 1859-м году. При окончании приготовления одного из моих барометров близ открытого его конца произошла трещина, чрез которую, пока я не обратил на это внимания, успело войти внутрь барометра три пузырька воздуха. После того трещина была залеплена мастикой, барометр перевернут, подвергался переноске и пузырьки подвинулись на некоторую высоту, так что первый остановился на расстоянии 32, второй — 48 сантиметров от верхнего конца барометрической трубки. Когда это было замечено, я с возможною точностью определил положение этих пузырьков и, кроме того, микрометром измерил их диаметры. Это было в августе 1873-го года. С тех пор неоднократно произведенные измерения показали, что ни положение пузырьков относительно стенок трубки, ни абсолютный их диаметр нисколько в пределах точности наблюдений не изменились, чего нельзя было бы ожидать, если бы ртуть растворя а воздух. Ртуть же, наполняющая этот барометр, была весьма чиста и долгое время нагрета в безвоздушном пространстве, а потому конечно была свободна от растворенного в ней газа.

При моих опытах над упругостью разреженного воздуха, произведенных в течение 1873—74 годов, употреблялся один барометр, в котором почти ежедневно переменялся уровень ртути на высоту всего атмосферного давления, так что в открытой ветви барометра уровень оставался постоянным, а в закрытой барометрической ветви уровень понижался или поднимался чрез выливание или вливание ртути. Это было необходимо по условиям опыта, как будет описано впоследствии. Когда измерялось большое давление, тогда вновь приливалось надлежащее количество ртути так, чтобы уровень ее в манометрической ветви оставался при всех давлениях один и тот же. Таким образом чрез этот барометр прошел чрезвычайно большой объем ртути. Этот барометр был несколько раз выверен, то есть для него находилась при этом каждый раз поправка. Первое исследование сделано было в декабре 1873 года, а последнее в апреле 1874 года. Поправка оказалась совершенно одною и тою же в пределах погрешности наблюдения ($\pm 0{,}02$ мм.). Это показывает, что чрез введение новой ртути в барометрическую трубку вместе с тем не вводится воздуха, растворенного в ней, потому что, если бы растворение было, то в барометрическую пустоту испарилось бы постепенно значительное количество воздуха.

Все эти факты дают повод сомневаться в прямом растворении газов воздуха во ртути. А если только допустить это, то приготовление барометра на холоду не представляет прямых поводов к тому, чтобы этим путем полученные барометры были менее абсолютны, чем прокипяченные барометры. Исходя из этой мысли, я испытывал многие способы наполнения барометрических трубок на холоду, но опишу здесь только два из этих способов.[1] Расположение приборов при первом из них изображено на рис. VII—4, а при втором на рис. VII—2. Первый был употреблен мною для наполнения многих барометрических трубок и представляет то удобство, что при его применении берутся обыкновенные барометрические трубки, тогда как второй способ требует трубок с особыми приспособлениями, как будет описано далее; но зато этот последний способ доставляет результат гораздо скорее, более верный, и несомненно более совершенный, чем первый способ. При первом из примененных мною способов холодного наполнения удобнее всего помещать барометрическую трубку запаянным концом вниз и прямо вертикально.[2] На открытом конце барометрической трубки в этом случае необходимо иметь суженную часть или особую припаянную стеклянную трубку меньшего диаметра, чем барометрическая трубка (как видно на рисунке близ A). На рисунке, изображающем этот способ приготовления барометров (рис. VII—4), представлено наполнение одного из моих нормальных барометров BA, имеющего в верхней барометрической камере B диаметр 32 мм., наибольшая же часть барометрической трубки имеет диаметр 12 мм., а конец 6 мм. в диаметре. Около этого конца A сбоку, в C, помещается

[1] Третий из них приведен в предшествовавшей выноске.

[2] Хуже, если трубка будет наклонена, потому что тогда угол встречи ртути с верхними стенками трубки будет мал, отчего могут в трубке оставаться воздушные пузырьки.

шарообразная колба для ртути, служащей для наполнения барометра. В шейку этой колбы, поставленной в песчаную баню, вставлена (и залита мастикою) пробка с четырьмя отверстиями; в одном из них вправлена воронка D с краном для прилития ртути. Внутри колбы трубка, приводящая ртуть, оканчивается весьма тонким капиллярным отверстием так, чтобы можно было приливать ртуть в виде ряда мелких капель. При составлении аппарата кран заперт и в колбе C не содержится ртути. Другое отверстие колбы сообщается при помощи трубки E со ртутным насосом L (и с водяным насосом M, см. § 31) и также снабжено краном. Таким образом из колбы C можно почти вполне удалить воздух. Третье отверстие колбы C сообщает ее при помощи трубки G (взяты были тонкие, гибкие, медные трубки, что облегчило составление прибора) с прибором JK, развивающим сухой, чистый водород. В четвертое отверстие колбы C вставляется короткая стеклянная трубка, назначенная для того, чтобы чрез нее продеть очень тонкую и потому гибкую стеклянную трубочку $abcd$, которою колба C сообщается с барометрическою трубкою AB. В открытый, кверху обращенный конец ее A вставлены и герметически залиты мастикою три трубки. Во-первых, вышеупомянутая очень тонкая стеклянная трубка $abcd$. Она проходит до дна трубки AB, равно как до дна колбы C. Во-вторых, трубка F с краном, сообщающая AB с ртутным насосом и, в-третьих, трубка H, также с краном, для сообщения с водородным прибором JK. Все эти краны, смычки и пробки (заливаемые мастикою) должны быть не только испытаны каждый в отдельности, но и в своей совокупности, чтобы прибор представлял совершенно герметическое скрепление. Испытание это облегчается манометром, помещенным при ртутном насосе L. Выкачав из всего прибора воздух, заметив стояние ртути в манометре и закрывая или открывая сообщение разных частей прибора, можно узнать, по постоянству или падению ртути, вполне ли держат или пропускают воздух отдельные части прибора. Новое замастичивание исправляет замеченные недостатки. Манометрическая трубка RS служит для выделения водорода, когда краны G и H отперты. Прибор составлен так, что в C и AB единовременно или в одном из них можно производить пустоту и наполнять ее потом водородом, что и даст возможность высушить прибор внутри с возможным совершенством. Нагревание C и AB ускоряет это сушение, составляющее первую и самую долгую операцию наполнения, после того как достигнута герметичность. Продолжительность эта зависит от того, что нет верных признаков полной сухости. Поэтому выкачивание, нагревание и введение сухого водорода я повторял раз по шести, доводя каждый раз потом упругость оставшегося газа до 1—2 миллиметров и оставляя в приборе это давление на несколько часов.[1] Когда высушивание окончено, медленно вливается из D чистая ртуть, причем колба C подогревается настолько, чтобы мастика на пробке не плавилась. Это помогает окончательному сушению ртути,

[1] Это возможно только при очень совершенных кранах и правильном замастичивании.

ибо приливание производится при возможно малом давлении газа в приборе, и при постоянной работе насоса. Когда в колбу влита вся необходимая для наполнения AB ртуть, производится еще раз сушение всего прибора, потом кран E, сообщающий колбу с насосом, закрывается и выкачивание производится только из трубки AB. Вводя при высушивании водород, я имел преимущественно две цели: во-первых, известно, что в нем испарение совершается быстрее, чем в воздухе, во-вторых, я рассчитывал прилипший к стенкам трубки воздух, если такой слой прилипшего газа существует, заменить водородом, который по моим опытам (стр. 2 [= 236], 95 [= 335]), по видимости, не прилипает (или мало прилипает) к стеклу. Сверх того, сушение нагретой ртути в атмосфере водорода должно было служить к удалению из нее кислорода, если он был, и содержание в приборе водорода устраняло возможность окисления. Когда после нового сушения в трубке AB вновь произведена возможная пустота, тогда при запертых кранах E и H, должно было открыть кран G. От этого давление в колбе C увеличивается и ртуть, взойдя по трубке ab, падает в трубку B, а именно наполняет ее со дна, ибо трубка $abcd$ доходит до самого дна B. Для того чтобы при этом можно было иметь в колбе C незначительное давление, высота поднятия ab должна быть не велика. Она обыкновенно была около 30 сант. Краном G можно регулировать приток ртути из C в B, а запирая G, или затворив F и отворяя E, можно совершенно прекратить приток ртути. В трубке AB ртуть можно сверх того нагревать, но это нагревание не должно быть доводимо до кипения, ибо тогда на стенках трубки остаются пузырьки газа (кислорода, происходящего от разложения окислов ртути?), трудно затем удаляемые. Во все время прилития ртути из трубки AB продолжается выкачивание паров и газов, чтобы они постоянно имели возможно малую плотность. Так дело продолжается до наполнения всей трубки AB ртутью. Тогда трубочка bc ломается,[1] замастичивание в A открывается и трубка cd вынимается из ртути. Оставшееся свободное (незанятое ртутью) пространство трубки A можно отрезать или слабым согреванием заставить ртуть расшириться до выливания и тогда обыкновенным способом, закрывая отверстие барометра (каучуковою пластинкою), должно перевернуть трубку в сосуд со ртутью. Еще лучше, если конец A оттянуть в тонкую трубку и ее загнуть, расширением от нагревания наполнить свободный конец и тогда перевернуть трубку в нормальное ее положение.

Все описанные манипуляции представляют то важное удобство, что при них нет нужды в поспешности, потому что при продолжительности манипуляций не происходит никакого вредного действия ни с прибором, ни со ртутью, если все соединения действительно герметичны. Все операции можно производить при наиболее благоприятных условиях и по желанию прекращать, а увеличивая в AB давление (для чего необходимо R запаять и заставить выделяться водород до давления большего, чем атмосферное), можно даже обратно перелить

[1] Воздух не может чрез cd ворваться в AB, когда она полна ртутью, хотя в AFH и будет пустота, потому что высота cd более барометрической.

ртуть из трубки A в колбу C, для чего тогда из нее должно выкачивать воздух. Таким образом в описанном приборе легко достигается сушение стенок и ртути и наполнение трубки ртутью в безвоздушном пространстве и со дна, а потому при этом в трубке и не остается воздуха или другого газа.[1]

Вышеописанный способ наполнения барометрических трубок представляет, однако, один недостаток, который при всех попытках я не мог устранить. Он состоит в том, что тонкая, весьма гибкая стеклянная трубка cd, вводимая до дна барометрической трубки, изгибается в ней, прилегает к одной из внутренних стенок барометрической трубки, и около этого-то места во время наполнения барометра остаются следы газа. Ни нагреванием, ни возможно полным выкачиванием совершеннейшим насосом нет возможности устранить этого обстоятельства. Затем, когда стеклянная трубочка по окончании наполнения барометра вынимается из ртути, на тех местах, на которых она прилегала внутри трубки, остаются рассеянные, весьма мелкие (едва видимые и редкие) газовые пузырьки, часть которых может затем перейти в барометрическую пустоту. Одним этим обстоятельством, а не чем либо другим я объясняю то, что все барометры, приготовленные по этому способу, оказались после испытания хотя с весьма малым содержанием, но все-таки с заметным содержанием некоторого количества газа в пустоте, как будет видно далее, при описании испытания барометров № 3 и № 4, наполненных именно этим способом.[2] Тщательно наблюдая за положением тонкой стеклянной трубки внутри барометрической и замечая затем места пузырьков, оставшихся после вынимания тонкой трубки, измерив затем диаметры пузырьков и те давления, под которыми они находятся во время измерения, можно было вычислить, какую упругость будет иметь воздух, перешедший из этих пузырьков в барометрическую пустоту определенной емкости. Расчет подобного рода всегда показывал, что упругость оставшегося воздуха была всегда больше вычисленной. Первоначально я полагал, что это зависит от отступления от Мариоттова закона в определенную сторону, но, сведя все наблюдения, сделанные в этом отношении, убедился с ясностью, что дело здесь зависит, главным образом, от того, что нам неизвестно истинное давление, под которым находится воздух в пузырьках. В самом деле, при этом ртуть представляет вогнутую поверхность, которая должна оказывать, по своей форме, значительное давление на заключенный в ней газ. При измерении давления газа в пузырьках надо было считать, что оно равно атмосферному + высота того столба ртути, который находится над пузырьками. В действительности же к этим давлениям надобно прибавить еще неизвестную величину капилляр-

---

[1] Описанный способ наполнения ртутью в более простом виде может служить во многих других случаях, например, при анализе газов, когда требуется, чтобы в приборе не оставалось воздуха.

[2] Обыкновенные способы наполнения, не исключая и обыкновенного кипячения (такого слабого, чтобы стенки остались чистыми), дают гораздо более худые результаты, которых нередко не замечают, потому что не изучают барометров с должною полнотою.

ного давления, оказываемого ртутью на воздух, а потому прямой расчет здесь невозможен, так как мера этого давления для вогнутых поверхностей ртути может быть определена только при допущениях, весьма сомнительных относительно капиллярного действия вогнутых поверхностей ртути, ибо их радиусы кривизны неизвестны.

§ 42

Второй из вышеупомянутых способов наполнения барометров ртутью, применяемый мною во всех последних приборах, изображен на рис. VII—2 при одном из моих барометров. Начала, руководившие меня при устройстве барометров этого рода, были следующие: 1-е. Желательно было вполне избежать операции перевертывания барометрических трубок после их наполнения ртутью. Такое перевертывание, как бы тщательно оно ни было совершено, всегда дает повод к сомнениям, потому что приходится приводить ртуть в прикосновение с посторонними веществами, и притом самая операция перевертывания при изготовлении широких барометров сопряжена с различными случайностями. 2-е. По этой причине желательно было произвести наполнение барометра ртутью тогда, когда уже все части его собраны, то есть барометрическая трубка укреплена в надлежащем месте. Если применять холодные способы наполнения, то для этого не представляется никаких непосредственных затруднений и достигаются удобства в распределении операций. 3-е. Сверх того, желательно было иметь средство для того, чтобы во всякое время после изготовления барометра можно было, не разбирая его на части, выделить из него могущий в нем оказаться воздух или другой газ. Это обстоятельство весьма важно, потому что после изготовления барометра могут оказаться в нем еще следы газа, которые можно было бы устранить, если бы расположение частей барометра было таково, что допускало это. Наблюдение, произведенное после поправки барометра, может показать его улучшение, и тогда поправку можно повторять несколько раз до тех пор, пока достигнута будет желанная степень совершенства барометра.[1]

[1] Возможно поправлять недостаток пустоты и в обыкновенных барометрах, но это требует разборки прибора, потому что производится при перевернутом положении трубки. Лучше всего такая операция удавалась мне при следующих приемах. Когда трубка наполнена ртутью и вправлена в оправу, а изучение ее показало, что в пустоте ее есть газ (приемы определения описаны далее), тогда она освобождается из оправы и переносится в открытую чашку со ртутью; в ней трубка наклоняется так, чтобы остался небольшой объем пустоты. Тогда нижний конец запирается (каучуковою пластинкою, если край гладок, а если он вытянут в тонкую трубку, — как о том выше упомянуто, то просто пальцем) и трубка вращается так, чтобы пузырек пустоты прошел около всех частей стенок трубки, исключая нижнего ее конца (ибо около него может быть воздух). При этом со стенок трубки перейдет в пустоту приставший воздух. Затем трубку должно повернуть запертым концом кверху и ртуть нагреть до того, чтобы она открыла чрез расширение запор и вытеснила из трубки то, что перешло в пустоту. Когда это достигнуто, трубку запирают и вновь перевертывают в чашку со ртутью. Повторение таких операций, как показал мне опыт, несомненно улучшает барометрические трубки. Я не довел до конца опыты приготовления барометров при помощи нагревания запаянного с обеих сторон барометра, но упоминаю здесь о них, потому что способ этот, пови-

4-е. Полезно бы устроить барометр таким образом, чтобы можно было его испытывать помимо непосредственного измерения высот при изменении уровня ртути. Это последнее всегда сопряжено с некоторыми погрешностями, во всяком случае продолжительно и требует особенно точных инструментов. Испытание прохождения электричества чрез барометрическую пустоту, при различных расстояниях электродов, дает более простое средство для убеждения в степени этой пустоты; ибо известно, что электропроводность в сильно разреженных газах, начиная от упругости в 1 мм., весьма быстро меняется и уничтожается при достижимой степени пустоты. 5-е. Желательно было, сверх того, так расположить части прибора, чтобы в барометрической камере можно было произвести кипячение ртути, не разбирая прибора и не усложняя его устройства.

На основании этих соображений устроен был первый барометр, изображенный на рис. VII—2. Он снабжен в верхней своей части A капиллярной трубкой FG, загнутой потом книзу. Эта капиллярная трубка содержит в себе, как и самый барометр, ртуть-и может быть сообщена с одним полюсом Румкорфовой спирали при испытании пустоты, тогда как открытый конец барометра сообщается с другим полюсом, идущим от спирали. Приведя ее в действие, можно убедиться, по явлению света, в степени пустоты, достигнутой в барометре. Если расстояние верхних уровней ртути в капиллярной трубке и в барометре, напряженность электричества и температура камеры будут постоянны, то явление, происходящее при прохождении электричества, будет конечно то же самое. Изменяя одну из этих величин, получим другое явление. Если пустота будет совершенная или весьма близкая к совершенству, то, при увеличении напряжения электричества и при уменьшении расстояния верхних уровней ртути, но при обыкновенной температуре, светового явления нет, и это может служить весьма просто наблюдаемым признаком известной степени совершенства барометра. Так как наблюдения этого рода весьма легко производить, то можно легко вновь убедиться в том, что барометр сохранил свое первоначальное состояние. Та же капиллярная трубка доставляет возможность удалить из барометрической камеры последние следы оставшегося воздуха, если они там оказываются. Для этого нужно только поднять уровень ртути в барометре до того, чтобы ртуть переливалась чрез капиллярную трубку; при этом она увлечет остаток

димому, даст отличные результаты. Наполнив барометр, как обыкновенно, открытый конец его должно вытянуть в тонкую трубку и загнуть, потом ртуть нагреть до 100° (часть выльется) и тогда запаять открытый конец и перевернуть в нормальное положение. При охлаждении образуется пустота, в которую перейдут газы со стенок. Вращая и нагибая трубку, в образовавшуюся пустоту можно перевести все газы и пары с остальных внутренних стенок трубки. Под конец трубка перевертывается опять запаянным концом кверху и ртуть в барометре нагревается. Когда верхний ее мениск дойдет до узкой шейки, запаянный конец распаивается, ртуть нагревается до выливания части ее, открытый конец запаивается и вновь та же операция повторяется. Прием этот положительно улучшает барометр, содержащий следы газов, но я не имел времени узнать, можно ли этим путем довести барометр до окончательного выделения последних следов газов.

воздуха вместе с собою. Вот общие начала, на которых основано устройство употребляемых мною ныне барометров. Самый способ приготовления барометра такого рода, понятный отчасти уже из сказанного, состоит в следующих операциях. Загнутая короткая трубка D, составляющая нижнюю часть барометра, должна быть снабжена коленчатою трубкою gh, служащею для прилития и отливания ртути. Другая ветвь этой трубки D составляет (присоединяя при помощи пробки и мастики или прямо припаивая стеклом, как на рисунке) самую барометрическую трубку AD, желаемой формы и размеров. Нижний конец ее может быть оттянут так, чтобы (образуя бунзеновскую барометрическую камеру) доходил до низу трубки D, а верхний ее конец должен быть снабжен вышеописанною капиллярною трубкою FG. Этот конец барометрической трубки должен непременно иметь вид правильного, равномерно съуживающегося конуса, постепенно переходящего в капиллярную трубку. Последняя должна быть, по возможности, малого диаметра, не более 1 мм., а лучше $^1/_2$ мм., или еще менее этого. Во время наполнения барометра в другую ветвь трубки D вставляется, при помощи пробки и мастики, или самая трубка B, или временная трубка значительного диаметра и достаточной высоты так, чтобы емкость ее была равна приблизительно $^1/_2$ емкости всего барометра. Верхний конец этой трубки B снабжается [1] краном n и трубочкою o. Чрез нее проводится и в ней замастичивается тонкая стеклянная трубка orq, доходящая с одной стороны до нижнего конца трубки B, а с другой стороны до дна стклянки J, со ртутью, поставленной сбоку. В этой последней находится кран r который, как и трубка s, проходит чрез пробку и залит мастикой в горле стклянки. Ртуть, назначенная для наполнения, предварительно наливается в стклянку J и лучше всего, если в эту же стклянку непосредственно из прибора для перегонки ртути она будет собрана. Таким образом мы получаем систему, состоящую, с одной стороны, из резервуара J со ртутью, а с другой стороны, из барометра, могущего наполниться из резервуара J со ртутью. Расширенный конец H капиллярной трубки FG и кран стклянки со ртутью r соединяются с возможно совершенным насосом и с прибором для отделения водорода. Кран n при этом, конечно, заперт. Одновременно производится выкачивание как из всего барометра, так и из стклянки со ртутью, а чрез то давление в них обоих будет одинаково, а следовательно ртуть не будет переливаться. Когда воздух выкачан, барометр нагревается для удаления могущей быть на поверхности влаги, наполнятся водородом, который вновь выкачивается, и так продолжается несколько раз до полного удаления последних следов влажности. Когда этого достигли, тогда воздушный насос оставляется в соединении только с капиллярною трубкою FGH и разбирается соединение его с резервуаром для ртути J. Тогда в этот последний впускается сухой водород, который давит на поверхность ртути, а чрез то по капиллярной трубке sq ртуть сперва восходит, а потом падает, наполняя трубки D и B, а отчасти самый барометр AD. Когда вся трубка B на-

[1] После наполнения барометра эти добавочные части конечно отнимаются.

полнена ртутью, тогда открывается кран n и расплавляется мастика около трубки o, воздух входит в B и ртуть подымается из B в барометр до более или менее значительной высоты, смотря по количеству влитой ртути. Она не должна при этом переливаться чрез капиллярную трубку FG, а должна достичь только некоторой высоты в резервуаре A барометра. Удалив затем вполне сосуд J со ртутью и запаяв мастикою отверстие o, продолжают до возможной меры выкачивать воздух из капиллярной трубки FG и потом мало по малу приливают ртуть из воронки m в трубку B, открыв зажим i, чрез что постепенно повышается уровень как в трубке B, так и в самом барометре A; наконец, здесь уровень доходит до капиллярной трубки, сперва поднимается в ней, а потом ртуть в ней падает и вытесняет оставшийся воздух. Когда это достигнуто, тогда зажим i запирается, а чрез зажим k выливается некоторое количество ртути, отчего уровень ее в B, в барометре A и в капиллярной трубке F падает. Выливание ртути продолжают до возможной степени так, чтобы образовалась возможно бо́льшая пустота в барометрической камере. Эту пустоту подогревают для того, чтобы удалить последние следы влаги и газов, оставшиеся на внутренних стенках камеры, и потом чрез воронку m вновь приливают понемногу ртути, чтобы вытеснить отделившиеся газы и пары опять чрез капиллярную же трубку FG. При этом необходимо, чтобы эта капиллярная трубка оставалась все время сообщенною с насосом. Это необходимо потому, что вследствие такого сообщения уровень ртути в капиллярной трубке будет стоять очень низко и перелившаяся в нее из барометра ртуть при этом замкнет в нижней части трубки тот воздух, который еще оставался в барометрической камере. Если воздуха оставалось еще много, то он прорвется при приливании ртути чрез капиллярную трубку в ртутный насос. Если же воздуха оставалось мало, он скопится вёсь под давлением вверху находящегося столба ртути в виде маленького пузырька, пристающего к стенке капиллярной трубки. Если бы уровень ртути в этой последней был высок, то этот пузырек был бы близ барометрической камеры и, следовательно, мог бы прорваться затем обратно в эту камеру. Если же воздушный пузырек пристал к стенке стекла, то затем около него может двигаться ртуть, не перемещая его, и не нужно опасаться за то, что при слабом движении ртути этот пузырек вместе с нею увлечется обратно в барометрическую камеру. Когда, после повторения несколько раз подобной операции, действительно получится только ничтожно малый пузырек газа или вовсе его не будет заметно, тогда барометр можно считать готовым, и окончание его приготовления должно начинать отливанием большого количества ртути из крана k, потом разобщением от воздушного насоса [1] и испытанием пустоты относительно электропроводности. Если барометр окажется при этом или после этого с содержанием значительного количества воздуха, то вновь можно повторить ту же самую операцию,

[1] Для того, чтобы при этом не мог чрез капиллярную трубку ворваться обратно воздух, необходимо, чтобы на загнутом вверх ее конце было расширение, вмещающее достаточное количество ртути для наполнения всей капиллярной трубки. Таково расширение H на нашем рисунке.

вновь соединив капиллярную трубку с воздушным насосом и вытесняя в нее остаток воздуха, бывший в барометрической камере. В дальнейшем изложении приводятся данные, показывающие результаты этого способа наполнения барометров, потому что барометры №№ 6, 7 и 8, равно как и многие другие, приготовлены были этим путем. Описанное теперь устройство барометров будет затем называться барометром с капиллярною трубкою. Нагревая ртуть в камере *A*, можно ее кипятить в пустоте и выделить газы и пары чрез капиллярную трубку *GF*. До сих пор я однако не имел времени изучить результат такой операции, хотя и убедился в ее безопасности по отношению к целости трубки.

§ 43

Барометры, употребленные в моих исследованиях, были все так устроены, чтобы измерение давления в них производилось при помощи катетометра, а потому необходимо было придать им такую форму, чтобы можно было их легко переносить и устанавливать для наблюдений пред катетометром. Для этой цели они снабжаются подставкою с тремя винтами, как это видно, например, на рис. VI—1, где *UBC* изображает барометр, видный в плане рис. V—1 под литерою *B*, и где *C* означает катетометр. Расположение моих барометров видно также на рис. IV—4 и в плане на рис. IV—5, а также на рис. VII—2. Все барометры я устраиваю сифонными, потому что при этом не только облегчается способ наблюдения высот, но и уменьшаются или почти сводятся на нуль капиллярные поправки. Первые устроенные мною барометры представляли резервуар, сделанный в чугунной треноге. В этот резервуар вкладывается чугунная крышка, в которую вправлены как барометрическая трубка, так и открытая трубка, служащая другою ветвью барометра. После вставления трубок крышка заливается слоем мастики, как видно на рис. VI—2, где a означает чугунную крышку, залитую мастикою. Таковы, например, барометры, изображенные на рис. IV—4 и VI—1. Таков же тот барометр, о котором впоследствии будет упоминаться под № 3. Такое устройство ясно из рис. IV—4; оно при всех своих выгодах представляет однако два практических неудобства: во-первых, чугунные резервуары невозможно получить герметическими, и хотя ртуть под обыкновенным давлением из них не выливается, но при изготовлении барометров, а также при употреблении их для определения малых давлений (как барометры) в резервуаре давление будет меньше, чем в атмосфере, и тогда воздух проникает чрез поры чугуна. Недостаток плотности металла оказывается тем, что внутрь резервуара входит воздух и чрез то, хотя медленно, но постоянно меняется уровень ртути. Этот недостаток может быть устранен только одним тем средством, что внутренность резервуара покрывается слоем мастики, и крышка, в которую вправлены трубки, заливается также толстым слоем этого вещества. Но при этом герметичность достигается только после весьма тщательной подготовки. Второе практическое неудобство таких чугунных сосудов для барометров состоит в том, что они вмещают в себе слишком много

ртути, и изменение в ее температуре отзывается значительными изменениями высот ртути в барометрических трубках. Вследствие этих причин в последнее время как манометры, так и барометры, употребленные мною, устроены на манер того, как изображено на рис. VII—2, то-есть состоят непосредственно из стеклянного сифона, только не цельного, потому что такой сифон при сколько-нибудь сложном устройстве барометра весьма трудно изготовляется, — а из сложного, состоящего по крайней мере из трех частей. Нижняя часть сифона состоит из трубки D, изогнутой в виде буквы U. В эту трубку при помощи пробки и мастики по способу, описанному на стр. 72 [=33], вмастичиваются как самая барометрическая трубка A, так и сифонная ветвь B. В нижней части D имеется сбоку трубка gh, служащая для введения ртути, что необходимо не только во время приготовления, как было выше описано (стр. 101 [=371]), но и при самом производстве наблюдений. В тех случаях, когда барометры устроены с чугунным резервуаром, при них также имеются приспособления для прилития и выливания ртути в барометр. Так, например, на рис. IV—4 и IV—5 резервуар A снабжен краном K и сосудом J для прилития ртути, а кран L служит для выливания ртути. На рис. VII—2 для этих же целей приспособлены воронка m с зажимным краном i и трубка для выливания с зажимным краном k.

Возможность увеличения и уменьшения количества ртути, находящейся в барометре, представляет легчайшее средство для достижения возможной правильности в образовании ртутных менисков. Известно, что при одном и том же диаметре трубки капиллярная депрессия ртути бывает неодинакова, смотря по тому, под каким углом встречает ртуть стенки стекла. От этого же последнего угла зависит и высота мениска, а именно, она тем больше, чем меньше угол встречи при одном и том же радиусе трубки. С увеличением же высоты мениска, как это давно известно, капиллярная депрессия возрастает; следовательно, измеряя высоту мениска при данном радиусе трубки, мы имеем возможность судить и о капиллярной депрессии. Если барометр не снабжен приспособлениями для увеличения количества ртути или емкости резервуара, ее содержащего, то при падении ртути в барометре, в открытой ветви мениск будет выпуклый, высота его будет большая и депрессия значительна, тогда как в самой барометрической трубке при этом мениск будет плоский, высота его будет менее нормальной и депрессия будет, вследствие того, незначительна. А потому, хотя бы диаметры барометрической и открытых ветвей были одни и те же, депрессии в обеих ветвях будут не одинаковы. То же самое, но только в обратную сторону, произойдет при поднятии барометра; а следовательно, всякий раз в сифонном барометре можно ждать неодинаковые высоты менисков и, следовательно, тогда не будет компенсации капиллярной депрессии в обеих ветвях. Нередко полагают, что одним простым встряхиванием барометра или качанием его достигается уравнение депрессии в обеих ветвях барометра. Этого нельзя считать справедливым, в особенности по отношению к качанию барометра, потому что при нем во всяком случае один из менисков будет больше

другого, по причинам вышеописанным, потому что при этом произойдет то же самое явление, какое происходит и при поднятии или опускании барометра.

Если же мы станем прибавлять ртуть в барометр или будем уменьшать емкость резервуара (как устроено, например, в барометре Фортеня), единовременно ртуть будет подниматься как в барометрической трубке, так и в открытой ветви барометра, следовательно, оба мениска будут иметь значительную выпуклость, возможно близкие высоты и, следовательно, возможно одинаковые депрессии, если радиусы обеих трубок одинаковы. При этом, однако, оба мениска получают значительную выпуклость, а следовательно и соответствующая им депрессия будет велика и самые незначительные разницы в высотах менисков будут соответствовать, в особенности при небольших диаметрах трубок, значительным разностям в депрессиях. Гораздо полезнее в этом отношении пред наблюдением не прибавлять, а убавлять количество ртути, регулируя это последнее так, чтобы как верхний, так и нижний мениски представляли некоторую, возможно малую высоту. Этим малым высотам будет соответствовать малая депрессия и следовательно могущие произойти случайные разности в высотах менисков будут оказывать гораздо меньшее влияние на точность результата наблюдений. Если трубки и ртуть чисты, то при этом нечего опасаться образования вогнутого или неясного мениска. Всякий недостаток в этом отношении будет при этом совершенно очевиден, потому что тогда на месте встречи стекла и ртути будет образоваться не прямая линия, а кривая, неправильная линия встречи ртути со стеклом. Поэтому я считаю наиболее практическим при сколько-либо нечистых барометрах наблюдения производить после приливания ртути и так, чтобы мениск был возможно выпуклый,[1] а при совершенно чистых барометрах производить его после *осторожного выливания ртути*, причем достигается наилучшее согласие результатов во всех отношениях.[2] В дальнейшем

[1] В случае не совершенно чистого барометра невозможно делать наблюдения при отливании ртути, потому что тогда мениск ртути не только может быть плоским, но даже и вогнутым и вершина его может быть не видна.

[2] Г. Вильд (Метеорологический Сборник 1874, т. III, стр. 18), рекомендуя вслед за тем, что было высказано мною (Артиллерийский Журн. 1872 г. август), способ уравнения менисков приливанием ртути, ошибочно высказывает необходимость делать наблюдения только после прилития ртути. Гораздо лучший результат получается при выливании, потому что вся поправка тогда становится меньшею и, следовательно, разницы в меньших величинах отзовутся и меньшею погрешностью результата. Для уяснения дела цитирую слова г. Вильда, выраженные в виде правила: «Aus diesen Erfahrungen habe ich für Normal-Barometer mit weiten Röhren die Regel abgeleitet, jeweilen vor der Beobachtung das Quecksilber ansteigen zu lassen, um normale Oberflächen herzustellen», то есть «при наблюдении нормального барометра с широкими трубками должно производить отчет после прилития (восхождения) ртути, чтобы получить правильные мениски» (стр. 18, III-го тома Метеорологического Сборника). Это правило, публикованное г. Вильдом в 1874 г., согласно с высказанным мною в 1872 году (Артиллерийский Журн. август): «следует все барометрические измерения производить при восходящем движении ртути, что легко достигается» (выноска) и (в тексте) «прибавляя и *убавляя* ртуть (в барометре), будем иметь возможность постоянно делать наблюдения при восходящем или нисходящем положении ртути, что содействует образованию мениска всегда одно-

описании приборов, употреблявшихся мною для определения давлений, будут встречаться приспособления для приливания и выливания ртути, и во всех наблюдениях, производимых такими приборами, я держался тотчас высказанного правила, о чем не буду впоследствии более упоминать.

Для устройства барометров и бароманометров употреблялись мною трубки от 16 до 40 мм. в диаметре; чаще же всего употреблялись трубки диаметром около 20 мм. При таком диаметре капиллярная депрессия сама по себе не велика, даже и при наибольшей высоте мениска, а при малых высотах мениска столь незначительна, что различие величин депрессии впадает уже в неизбежные погрешности наблюдений. Это можно видеть даже непосредственно при наблюдении, потому что в широких трубках после выливания ртути верхняя часть мениска становится действительно плоскою в пределах точности наблюдения. Если разделить диаметр трубки (в 20 мм. диам. и более) на три части, то оказывается, что вся средняя треть представляет, после уменьшения ртути, поверхность настолько плоскую, что при увеличении в 30 раз не открывается в ней заметного понижения к краям даже при наблюдении с точностью до 0,003 мм. А если верхняя часть мениска кажется плоскою в пределах точности наблюдения, то очевидно, что депрессия в этих же пределах должна быть ничтожно малою. По этой причине в большинстве наблюдений, производимых мною в широких трубках, не вводилось вовсе поправки на капиллярную депрессию. При выборе широких трубок я руководствовался тем соображением, что существую-

---

образной формы». При всем подобии правила г. Вильда с моим есть разность в них: 1) Г. Вильд советует прибегать к прилитию в *широких* барометрах, а для них оно наименее важно; при узких он и не устроил прилития; 2) г. Вильд советует прибегать всегда к прилитию, а при нем мениски высоки и, следовательно, депрессия велика, а потому лучше, где возможно, прибегать к отливанию, ибо тогда мениски невысоки, а потому депрессия мала и ее возможные разности менее, чем при высоких менисках. Таким образом г. Вильд, повторив правило, высказанное мною, не точно применил его и приписал его себе. Важность же высказанного правила видна из слов самого г. Вильда, который, выставив указанное правило, говорит тотчас вслед затем, что только при таком способе наблюдений точность результата может превосходить 0,1 мм. (стр. 18). По этой одной причине я считаю уже необходимым поднять здесь вопрос о приоритете обсуждаемого правила. Притом в бытность мою весною 1872 г. на главной метереологической обсерватории, когда я уже высказал правило, о котором идет речь, и сообщил о том г. Рыкачеву (помощнику г. Вильда), при нормальном барометре обсерватории не было никакого приспособления для прилития ртути и этот недостаток тогда же мною был замечен. Удерживаю за собой принадлежащее мне правило особенно потому, что во всех моих наблюдениях я руководствовался им и достигнутая мною степень точности результатов не мало зависит от его применения. Я бы потерял свое право первенства, если бы не публиковал моей предварительной статьи, но ныне, имея убеждение в принадлежности мне указываемого правила, я пользуюсь и обычным способом доказательства научного права первенства, то есть тем, что ясно высказал в печати обсуждаемое правило ранее г. Вильда. Как выше указано, я высказал обсуждаемое правило в 1872 году. Книга г. Вильда, читанная, как значится в заголовке, в заседании Академии 20 мая 1873 года, явилась позже того из печати, что видно уже по одному тому, что на стр. 92, 96, 98 и мн. др. имеются позднейшие данные даже от 1874 г. Поэтому очевидно, что г. Вильд, столь много писавший с 1870 г. о барометрах, разбираемое правило нашел и применил позднее меня.

щие ныне данные для определения зависимости между капиллярною депрессиею и высотами менисков страдают отсутствием надлежащего согласия в пределах тех точностей, которых можно достичь при изменении высот ртутных столбов. В этом я практически убедился тем, что первые изготовленные мною барометры имели диаметры около 15—16 мм. и при сравнении их между собою (при постоянных объемах пустоты) оказались разности, ничем другим не объяснявшиеся, как только неточностью в капиллярной поправке, которая определялась по таблицам Поля и Шабуса. Ввиду этого обстоятельства, с одной стороны, я увеличил диаметр барометрических трубок, а с другой стороны, мною предприняты были наблюдения для определения капиллярной депрессии. Эти наблюдения впоследствии будут опубликованы.

§ 44

Что касается до определений самых высот ртутных столбов, то они производились при помощи компараций, а именно способом, который будет ясен из объяснения рис. IV—4. Между барометрическою трубкою ED и сифонною трубкою B помещается стеклянная трубка M с миллиметрическими делениями. Она предварительно была при определенной температуре сверена с нормальным метром и калибрована по частям, как будет описано далее. Во время наблюдения, температура этой шкалы, а равно и температура ртутного столба определялись при помощи двух термометров, показывающих температуру воды, протекающей внутри шкалы и около барометрической трубки. Для этой цели из водяного резервуара, находящегося в той же комнате, где производится наблюдение, сперва чрез Вульфову стклянку, с термометром, а потом чрез трубку a проводится вода в трубчатую шкалу M (предварительно эта трубка должна быть наполнена водою снизу, чтобы не осталось воздуха). Вода, войдя в шкалу чрез отросток b, выходит из нее чрез такой же отросток c внизу (рис. IV—5). Затем по каучуковой трубке и стеклянной трубке d вода входит в трубку HG, окружающую барометр; затем выходит из нее чрез трубку e и чрез f вытекает из всей системы, причем термометр t показывает температуру вытекающей воды. Температуры притекающей и вытекающей воды оказываются весьма мало различающимися, а именно не более как на 0,05°, а потому бралась средняя температура втекающей и вытекающей воды для определения температуры шкалы и ртути. Этой малой разности в температуре входящей и выходящей воды можно было достичь только тогда, когда вода имела температуру, близкую к окружающей прибор. Такой способ устройства дает возможность ручаться с некоторой уверенностью за температуру ртути в барометре. Если барометрическая трубка не окружена водою (как обыкновенно и было у меня), то в обыкновенных условиях температура верхних частей ртути отличается от температуры нижних частей ее на 0,2° или даже на 0,3°, а так как при наблюдении неизбежно приближение наблюдателя, чему отвечает повышение температуры, то в это время совершаются колебания температуры, нарушающие уверенность в результате наблюдения. Если

не будет уверенности в определении температуры на 0,2°, то нельзя ручаться в определении барометрических высот по этой одной причине на 0,03 мм. Вышеописанное устройство для определения температуры шкалы и ртути однако не могло быть приспособлено ко всем моим приборам, и там, где это не могло быть сделано, применялся следующий способ для определения температуры ртути. В верхних и нижних частях прибора, а иногда и в средних (см. рис. VII—2, $t_1 t_2 t_3$ рис. VI—1, I) помещались трубки такого же диаметра и такого же стекла, как и барометрическая. В них наливалась ртуть и помещались сравненные термометры, по показанию которых и определялась температура ртути. Самое определение высот барометров производилось в большинстве случаев катетометром с двумя трубами, изображенном на рис. VIII—1. Он будет описан в одной из следующих глав. Там же будет описан и самый способ компарации со всеми подробностями и поправками, которые при нем были введены. Здесь мы только упоминаем о том, что непосредственное применение шкал самого катетометра для определения высот представляет во всяком случае менее гарантий точности, чем способ компарации с отдельно стоящею шкалою, потому что эта последняя, находясь от наблюдателя в бóльшем расстоянии, чем шкала катетометра, подвергается меньшему случайному изменению от нагревания и других причин, а также потому, что в двух местах катетометрическая труба не может представлять одинаково горизонтальной установки, и при передвижении трубы легко совершаются изменения в ее положении, влекущие за собою необходимость поправки винтом, ставящим катетометрическую трубу в горизонтальное положение; а при этом расстояние нуля шкалы нониуса от оптической оси трубы подвергается изменению. Вследствие этих причин, при определении высот непосредственно одним катетометром, вкрадываются погрешности по крайней мере вчетверо бóльшие, чем при употреблении катетометрических труб только для сравнения высот ртути с расстояниями делений на отдельно стоящей шкале. Небольшие разности, не превышающие $^1/_2$ мм., между ближайшим миллиметрическим делением шкалы и наблюденною высотою мениска, определялись при этом окулярным микрометром, находящимся при катетометрических трубах (L, рис. VIII—1).

Не считаю нужным останавливаться на описании способов поправки наблюдаемых высот на изменения шкалы и ртути от температуры, потому что при этом я держался обыкновенных способов. Для поправки высоты ртути применялись те коэффициенты расширения ее, какие указаны в § 26, стр. 58 [=314], а для поправок на расширение шкал применялись коэффициенты, непосредственно определенные для каждой шкалы, как будет описано в одной из следующих глав. При этом должно заметить, что компарация самых шкал с нормами производилась при температурах, близких к обыкновенной температуре, то есть той, при которой происходили самые наблюдения, а потому погрешность в определении коэффициента расширения шкал имела незначительное влияние на результат, ибо температурный множитель в поправке не превышал ни в каком случае 5—6°.

§ 45

Важнейший предмет при применении барометров, в особенности для тех целей, которые преследовались мною, составляет определение поправки на упругость газов, оставшихся в барометрической пустоте. Мне до сих пор не удалось иметь, да я думаю и никто еще не имел в руках барометра, действительно *вполне чистого и совершенно абсолютного*. Выше (стр. 94 [= 364]) был упомянут прокипяченный барометр (*n*° 1), показания которого были действительно абсолютны, но предел точности наблюдений в этом барометре не велик потому именно, что трубка была не чиста. Некоторая нечистота бывает и на всех *вполне* (долго) прокипяченных барометрах. В барометрах же, приготовленных без кипячения ртути, поверхность ее и стенки трубки чисты, но зато всегда остаются хотя малые следы газов, оказывающие упругость, уменьшающую барометрическую высоту. Барометр при одном из приборов (*n*° 5) для наблюдения сжимаемости под малыми давлениями, устроенный мною в апреле 1874 года, с приспособлением нисходящей капиллярной трубки, оказался тотчас после приготовления действительно вполне абсолютным. Это можно было видеть в нем из следующего наблюдения, которое будет понятно после ознакомления с его устройством. В нем находятся рядом два барометра, соединенные вверху трубкою, так что у них обоих одна барометрическая пустота. Оба барометра сифонные, с приспособлениями для приливания и выливания ртути. Сперва в обоих барометрах ртуть была поднята до самого верху так, чтобы пустота занимала объем, оставшийся в соединительной трубке, а именно, около 10 куб. сант. Затем на мениск одного из барометров была направлена труба катетометра, а из другого барометра выливалась ртуть, так что образовавшаяся пустота занимала объем около 210 куб. сант. При этом не замечено было ни малейшего поднятия ртути в первом барометре. Это бы произошло, если бы в пустоте были хотя малейшие следы газа. Этот барометр был затем в течение четырех летних месяцев оставлен при обыкновенной температуре и при этом отчасти подвергался действию солнечных лучей. Когда затем (в сентябре 1874) с ним было произведено то же самое определение, то оказалось, что в барометрическую пустоту перешло уже некоторое количество газа,[1] и при выли-

[1] Откуда взялся этот газ,—я не могу определить, но, судя по фактам, указанным на стр. 97 [=367], я не думаю, чтобы этот газ испарился из ртути. Есть повод думать, по обстоятельствам дела, что этот газ случайно проник в барометрическую камеру, или, что еще вероятнее, от случайных повышений температуры на солнечном свете часть окислов ртути, в ней содержащихся, выделила из себя кислород. Так как этот двойной барометр снабжен капиллярною трубкою, то и есть повод думать, что его можно было бы вновь довести до первоначальной абсолютности. Ныне, при объеме пустоты, равном 210 куб. сант., в нем упругость оставшегося газа =0,09 мм. Главная выгода этого двойного барометра, для определения малых давлений, состоит именно в том, что объем пустоты в нем при всяком положении ртути можно сделать равным определенной величине, в моем приборе = 210 куб. сант., а потому поправка на упругость газа, оставшегося в пустоте, при всех определениях тогда будет одинакова, что особенно важно при определении малых давлений. Для этой то цели и построен был мною такой двойной барометр. Его устройство будет впоследствии описано с подробностию. В применении барометров к определению атмо-

вании ртути из одного барометра, то есть при увеличении объема пустоты, замечалось поднятие ртути в другом барометре. В обыкновенных барометрах наблюдения подобного рода сопряжены с гораздо бо́льшими погрешностями, и потому считаю необходимым описать ход наблюдений и их расчет в применении к барометрам обыкновенного устройства, например как тот барометр, который изображен на рис. IV—4.

Дабы иметь возможность точным образом произвести поправку на упругость газа, оставшегося в барометре, необходимо знать объемы, занимаемые газом в пустоте, а потому верхняя часть барометрической трубки должна быть снабжена делениями, и емкости, соответствующие им, должны быть пред изготовлением барометра определены по весу ртути или воды, ими занимаемыми, начиная от верхней части барометра. Проще всего это достигается, если употребить для верхней части барометров уже готовые, находящиеся в продаже трубки бюреток или пипеток, снабженных делениями на части равного объема. Тогда приходится только проверить емкости и узнать объем самой верхней части камеры от нуля делений шкалы. В тех случаях, когда трубка не снабжена делениями и прежде не калибрована, об объеме пустоты можно с достаточною в большинстве случаев точностью судить по измерению наружного объема трубки,[1] если предварительно знать толщину стенок трубки. Но это мало удобно в дальнейшей практике, потому что поправка на упругость оставшегося воздуха отвечает ёмкости, а потому измерение емкости нужно производить при каждом наблюдении, а следовательно и расчет их должен быть возможно легкий.

Так как наблюдения, необходимые для определения поправки, должны длиться в течение по крайней мере получаса, а в это время стояние барометра может значительно изменяться, то в течение этого времени необходимо вместе с определением высот испытываемого барометра, при различных емкостях пустоты, производить наблюдения над другим барометром, показывающим изменения в атмосферном давлении. Для этой последней цели в моих опытах чаще всего употреблялся дифференциальный барометр, описываемый в следующей главе. Для этой же цели может служить и другой ртутный барометр, подобный испытываемому и наблюдаемый в промежутке между временами наблюдения над испытываемым барометром. Наблюдения над этим другим барометром (или над дифференциальным) покажут те изменения,

---

сферного давления легко можно достичь того, чтобы объем пустоты, а следовательно, и упругость оставшегося в ней газа были постоянны, если в барометрической ветви всегда доводить уровень ртути до одного места, что легко достигается, когда есть средства для прилития и отливания ртути, как в моих барометрах. Что касается до изменения упругости воздуха, остающегося в пустоте, при перемене температуры, то оно столь ничтожно, что не может быть наблюдаемо. Пусть, например, упругость газа, оставшегося в пустоте при 20°, = 0,200 мм. (столь большая упругость в барометре может быть всегда избегнута); она при 15° будет = 0,196, при 25° = 0,204, а такие разности неощутительны при наблюдении барометрических высот, да и такие различия температур не встречаются.

[1] Так, например, поступил г. Вильд при исследовании нормального барометра нашей метеорологической обсерватории (см. Метеорологический сборник Т. III—36).

которые произойдут в упругости атмосферного воздуха в течение времени наблюдения. По ним должно составить, произведя все необходимые поправки, *выражение для изменения барометрических высот со временем*. С точностью, достаточною в большинстве случаев, это изменение выражается линейным уравнением, как видно из примеров, ниже прилагаемых. Если бы этот второй барометр и был неверен и если бы для него не было известно истинной поправки на упругость газа в пустоте, то все-таки показания его совершенно достаточны, потому что при малых изменениях барометрических высот упругость газа в пустоте будет изменяться весьма незначительно, если только емкость пустоты довольно велика. Необходимо, однако, чтобы этот второй барометр имел не меньший диаметр, чем исследуемый, чтобы не взошла погрешность от капиллярности. Все наблюдения, полученные в испытываемом барометре, должно отнести, на основании полученного уравнения для изменения высот со временем, к некоторому среднему времени наблюдения, например, если наблюдения будут производиться от 10 до 11 часов, то отнесем все наблюдения к 10 ч. 30 м. Для того, чтобы сделать такую поправку на время, и служит уравнение времени, найденное по показаниям второго барометра. Пусть, например, показания этого второго барометра дадут (между 10 и 11 часами), приняв при 10 ч. 30 м. стояние барометра за H, при t минутах высоту H_t, которая найдется из уравнения $H_t = H + at$. Следовательно $H = H_t - at$. Если на испытываемом барометре наблюдение было сделано во время t (считая от избранного среднего), то эту величину должно помножить на a и at вычесть (обращая внимание на знак в at) из наблюденного стояния изучаемого барометра, чтобы получить высоту испытуемого барометра в избранное среднее время. Таким образом, и в испытываемом барометре все наблюдения будут отнесены к одному определенному времени. Если бы выражение барометрических изменений по времени было в действительности линейное, то тогда дело можно было бы упростить, расположив время между наблюдениями при одинаковых условиях в равном расстоянии от некоторого среднего времени и взяв затем среднее. Например, в 10 ч. сделать наблюдение при емкости пустоты V_0, в 10 ч. 10 м. наблюдение при емкости пустоты V_1, в 10 ч. 20 м. при V_2, в 10 ч. 30 м. при V_3, наибольшем возможном объеме, в 10 ч. 40 м. опять при объеме V_2, в 10 ч. 50 м. при V_1 и в 11 ч. при V_0. Взявши среднее из показаний в 10 и в 11 часов, то есть при V_0, мы получим тогда стояние при объеме V_0, относящееся к 10 ч. 30 м. Точно так же и для других объемов. Но встречается нередко, что в течение довольно долгого времени, необходимого для точного испытания барометра, изменения в высотах со временем не всегда могут выражаться прямою линиею, а для определения пределов погрешности наблюдения требуется кривая, иногда очень с быстрым перегибом. Притом время, потребное на выливание ртути, может быть весьма кратко, тогда как при прилитии ртути необходимо соблюсти больше осторожности, и приливание должно совершать гораздо медленнее; а потому нельзя расположить соответственных наблюдений при равных объемах при приливании и выливании на одинаковые промежутки

времени. Сверх того, если объемы при прилитии и выливании делать одинаковыми, то на это расходуется очень много времени и наблюдения становятся мало точными, вследствие того, что для такого уравнивания приходится многократно приближаться к барометру и чрез то значительно содействовать непостоянству температурной поправки. Вследствие этих причин, вышеописанный сокращенный способ наблюдения при равных расстояниях времени не дает столь точных результатов, как способ наблюдения при помощи двух барометров, когда получается уравнение для поправки на время.[1]

В случае недостатка другого барометра (и при недостатке дифференциального барометра) можно получить уравнение для времени и на том же самом испытываемом барометре, если наблюдения при некотором постоянном объеме, например, при самом большом объеме пустоты, произвести в течение всего времени исследования несколько раз. Но тогда точность результата будет меньше, чем при двух барометрах, потому что наблюдения, касающиеся до влияния времени, будут значительно удалены друг от друга. Для устранения этого недостатка и для уничтожения поправки на время я применяю в последнее время следующий способ, который и можно рекомендовать более всех прочих. В большой водяной ванне, окруженной худыми проводниками тепла и снабженной мешалкою, помещается стеклянный сосуд большой емкости; температура воздуха в сосуде удерживается с возможным (до 0°,003) постоянством. Сохраняется и первоначальный объем воздуха, а потому давление воздуха в сосуде остается постоянным. Если совершаются малые изменения в температуре или объеме газа, то по ним исправляется упругость. Соединив барометр с таким сосудом, имеем постоянное давление.

Для удовлетворения той же цели в моей лаборатории устроен колодец, углубленный в землю на $3^1/_2$ аршина, то есть на такую глубину, при которой перемены температуры не только в течение краткого времени наблюдения, но и в течение дня ничтожно малы. В этом колодце помещены большие стеклянные баллоны (в 56 и 20 литров емкостью), оканчивающиеся тонкими металлическими трубками, выходящими в комнату и герметически соединенными с баллонами. Одну из таких трубок должно соединить с открытою ветвью барометра и с пипеткою, в которой можно по произволу увеличивать или уменьшать объем влитой в нее ртути. Эта пипетка помещена в резервуаре с водою для получения постоянной температуры. Необходимо, чтобы вся система соединений была совершенно герметична, и если в ней заперт воздух под определенным давлением, то объем этого воздуха можно сделать всегда постоянным таким образом, что когда объем воздуха в барометрической ветви убавляется (при приливании ртути в барометр), тогда из пипетки выливается столько ртути, сколько вытеснено воздуха из ветви барометра, находящейся в сообщении с пипеткою. Так как объем

[1] Такой еще более сокращенный способ применен для проверки нормального барометра нашей Метеорологической обсерваторией (см. Т. IV. стр. 38). В моих первых наблюдениях я также применял этот сокращенный способ, но давно уже нашел его мало удовлетворительным.

баллона более 56 литров, а емкость ветви барометра менее 100 куб. сант., то небольшая погрешность в определении объемов будет оказывать малое влияние на изменение давления. То же самое относится и до небольшого изменения в температуре воздуха, находящегося в барометре. И так открытая ветвь барометра соединяется с сосудом, содержащим воздух при постоянной температуре. Так как объем и температура этого воздуха постоянны, то и его упругость постоянна. Вследствие этого, на одну ветвь барометра будет при всех условиях действовать постоянное давление, которое и будет определяться барометром при разных емкостях пустоты. Такой способ вполне устраняет поправку на время и при некотором навыке обращения с прибором представляет большую легкость выполнения. Он требует, конечно, того, чтобы и на открытой ветви барометра были нанесены деления, показывающие емкость оставшегося воздуха, которые должны быть приведены в согласие с делениями пипетки, употребленной для компенсации. Так или иначе, необходимо отнести все показания испытываемого барометра, при разных емкостях пустоты, к одному определенному времени, то есть к одному определенному давлению, и только тогда можно производить определение поправки на упругость оставшегося в барометрической камере воздуха с достаточною степенью точности.

В испытываемом барометре сперва делается наблюдение при некотором объеме барометрической камеры V_0, потом при нескольких других объемах $V_1, V_2, V_3 \ldots V_n$. Эти объемы конечно должны быть значительно различны, но необходимо при малых объемах делать наблюдения ближе друг к другу, чем при значительных объемах пустоты, потому что при сжатии газа, заключающегося в барометрической камере, давления возрастают гораздо заметнее, чем при значительном разрежении этих газов. Особенно важно сделать возможно точные наблюдения при наименьшем возможном объеме. Этот наименьший объем, по самому существу дела, нельзя сделать очень малым, потому что в верхней части барометр имеет сужение, выпуклая запаянная поверхность которого мешает точному наблюдению стояния верхней части мениска. Последнее наблюдение нужно делать в том месте, где барометрическая трубка еще совершенно цилиндрична и загнутость поверхности не препятствует отчетливости наблюдения. Что касается до наибольшего объема, то желательно вообще, чтобы он был в несколько раз больше наименьшего объема. Вообще полезно устраивать в барометрах как можно бо́льшую камеру и производить наблюдение барометрических давлений при таком стоянии ртути, чтобы пустота занимала наибо́льший возможный объем, потому что тогда поправка на упругость оставшегося воздуха будет наименьшая, следовательно, наиболее вероятности будет в том, что чрез введение ее не получим значительной погрешности. При данном объеме V_n желательно иметь несколько наблюдений и по крайней мере два: при приливании и выливании ртути, то есть при увеличении и уменьшении объема, потому что есть повод думать, что показания барометра в обоих случаях могут быть неодинаковы, потому что при увеличении объема ртутные пары еще могут не образоваться, а при уменьшении объема они могут еще

не сгуститься в жидкость и, следовательно, в первом случае давление уменьшится, а, во втором, увеличится вследствие этих обстоятельств. Правда, что тщательные наблюдения, сделанные мною в этом направлении, не показывают в среднем результате заметных разностей в том и другом случаях, но в некоторых отдельных наблюдениях явление этого рода будто бы становилось заметным. Полученные при данном объеме пустоты наблюдения должны быть затем исправлены во всех отношениях, то есть по отношению к показанию шкалы к температуре и по отношению ко времени, и из всех наблюдений, относящихся к данному объему конечно должно взять среднее. Результат наблюдения выразится в данных двух родов. Во-первых, при некотором наибольшем объеме M найдется высота барометра в среднее время при 0°, назовем ее H; а затем получатся разности между этою высотою и высотою при 0° и при среднем времени при различных других объемах V_i. Все эти высоты будут меньше H, а потому для данного объема V_i найдется разность y_i, отвечающая данному объему. Следовательно, наблюденное давление при V_i будет $= H - y_i$. Когда получен этот практический результат наблюдений, его дальнейшая обработка зависит от значений, полученных для y. Если значения эти вообще не велики, то тогда вся искомая поправка мала и, следовательно, тогда прямо можно находить поправку по Мариоттову закону. Но если разности y велики, то есть достигают миллиметра или близки к нему, или превосходят его, то тогда поправка на основании Мариоттова закона оказывается недостаточною в пределах погрешности наблюдения, и тогда нужно руководствоваться более полным способом поправки барометрических высот. Мы рассмотрим оба эти способа.

§ 46

Если производить поправку на основании Мариоттова закона, то дело становится весьма простым. Желательно знать, чему равно истинное барометрическое давление в среднее время наблюдения, если при объеме V_i показание барометра есть $H - y_i$, а при объеме M показание есть H. Упругость воздуха в барометрической камере, когда ее объем есть V_i, равняется очевидно искомому давлению, которое обозначим чрез $H + x$, без наблюденного давления $H - y_i$, т. е. она равна $x + y_i$. При объеме M упругость воздуха в барометре будет очевидно $= x$. А по закону Мариотта $Mx = V_i(x + y)$, откуда и найдется:

$$x = V_i \frac{y_i}{M - V_i}.$$

Найдя значения x при разных V_i, получим, конечно, не вполне одинаковые величины, потому что в этой поправке заключаются не только все погрешности, сопряженные с наблюдениями, но и отступления от Мариоттова закона. Но если x мало, то разницы будут находиться в пределе погрешностей наблюдения, а потому, взяв среднее из всех найденных x, найдем вероятнейшее значение поправки, которую должны ввести в показание барометра, когда объем пустоты равен M.

Зная величины M и x и перемножив их, мы имеем произведение из объема на давление, которое, по закону Мариотта, справедливо при всех объемах и давлениях, следовательно, есть величина постоянная. А потому, если в дальнейшем ходе наблюдений объем барометрической пустоты будет V, то найденное произведение xM надо разделить на V, и частное покажет ту поправку, которую должно ввести в показание барометра при объеме пустоты V. Такой способ нахождения поправки особенно важен в тех случаях, когда барометр употребляется как манометр с постоянным уровнем ртути в манометрической ветви (то есть с переменным объемом пустоты) и, следовательно, емкость пустоты при переходе от малых к значительным давлениям весьма значительно меняется. Поправка тогда непосредственно найдется каждый раз, от считывая объем пустоты V и зная постоянную величину xM, найденную вышеописанным способом. Если считать предел погрешности наблюдения в барометрических высотах столь значительным, как, например, считает Реньо (0,1 мм.), то тогда указанный здесь способ расчета будет совершенно удовлетворителен для барометров, представляющих даже довольно значительное содержание газа в пустоте. Опыты, сделанные мною в этом отношении над таким барометром, в котором искусственным образом оставлен заметный пузырек воздуха, подтверждают это с ясностью. Но эти же опыты показывают, что в более узких пределах погрешности такой способ расчета неудовлетворителен, и вследствие этого обстоятельства я ввел при своих расчетах более точный способ, который можно назвать вторым приближением по отношению к вышеописанному способу, составляющему первое приближение к истине. Дело в том, что истинного закона сжимаемости газов при столь малых давлениях, какие они имеют в барометрической пустоте, мы совершенно не знаем, а следовательно нельзя руководствоваться Мариоттовым законом в том случае, к которому применимость его совершенно неизвестна. Наблюдения над газами при давлениях, гораздо более высоких, чем такие, которые встречаются в барометрических камерах, показывают однако, что отступления от закона, вообще говоря, не очень велики, а потому при расчете данных наблюдения можно допустить для второго приближения, что произведения из объемов на давления изменяются таким образом, что

$$PV = a + bP,$$

где P и V суть упругость и давление, a и b постоянные коэффициенты (для данной массы газа), на основании которых и можно сделать поправку. Их надо найти из данных опыта. Допустив Мариоттов закон, мы признаем $b = 0$; приняв отступления от него, все таки b будет очень мало, а так как и вся масса газа относительно не велика, то значение P, а потому и величина a невелики, сравнительно с значениями V. Употребляя те же обозначения, что выше, мы имеем:

M объем пустоты, при коем показание барометра $= H$
V_1 „ „ „ „ „ „ $= H - y_1$
V_2 „ „ „ „ „ „ $= H - y_2$

Требуется найти $H + x$, то есть показание барометра в том случае, когда емкость пустоты = бесконечности. При объеме M упругость воздуха в камере $= x$, при V_1 она $= x + y_1$, при V_2 она $= x + y_2$, а потому имеем три уравнения:

$$Mx = a + bx; \quad V_1(x + y_1) = a + b(x + y_1); \quad V_2(x + y_2) = a + b(x + y_2),$$

где три неизвестных: a, b и x, которые и определяются из них.

Значение для x тогда будет:

$$x = \frac{V_1 - V_2}{\frac{M - V_1}{y_1} - \frac{M - V_2}{y_2}}.$$

Для удобства дальнейших рассуждений, в их общей форме, лучше вместо предшествующего выражения $PV = a + bP$ принять [1]

$$P_i V_i = c + \frac{d}{V_i},$$

которое по существу тождественно с предшествующим, то есть составляет второе приближение, если выражение $P_i V_i = c$ есть первое приближение, то есть закон Мариотта. По этому выражению:

$$M^2 = Mc + d; \quad V_1^2(x + y_1) = V_1 c + d; \quad V_2^2(x + y_2) = V_2 c + d,$$

откуда находим, приняв для удобства означение $M = V_0$ и $x = y_0$:

$$y_i = \frac{cV_i + d}{V_i^2} - \frac{cV_0 + d}{V_0^2}, \qquad A$$

Ибо имеем вообще:

$$V_i^2(y_0 + y_i) = V_i c + d.$$

Следовательно:

$$V_i^2 y_i = K_0 + K_1 V_i + K_2 V_i^2, \qquad B$$

где

$$K_0 = d; \quad V_1 = c; \quad K_2 = -\frac{cV_0 + d}{V_0^2} = -\frac{K_1 V_0 + V_0}{V_0^2}.$$

В форме B данные опыта, хотя бы число их было больше, чем необходимо, легко решаются по способу наименьших квадратов, особенно по методу Чебышева. Найдя из данных опыта вероятнейшие K_0, K_1 и K_2, можно видеть: 1) удовлетворяет ли им избранное усло-

---

[1] Это выражение тождественно в пределах опыта с выражением $PV = a + bP$, ибо по нему $P = \frac{a}{V - b}$, а следовательно $PV = \frac{a}{1 - \frac{b}{V}}$; при малом $\frac{b}{V}$ имеем, пренебрегая величинами высших порядков, $PV = a\left(1 + \frac{b}{V}\right)$, а это выражение тождественно с принятым, означив $a = c$ и $ba = d$.

вие для P_1V_1, ибо в таком случае вероятнейшее K_2 будет $= \frac{K_1V_0 + K_0}{V_0^2}$; 2) какое вероятнейшее значение имеют c и d и 3) каково будет y_1 [1] в том случае, когда V_1 будет $= \infty$, то есть сколько должно прибавить к наблюденному при объеме $M = V_0$ давлению H, чтобы получить искомое давление при бесконечно большом объеме. Идя этим путем, можно получить полное убеждение в достаточности предположения необходимости решения вопроса о барометрической поправке.

Предшествующий способ нахождения поправки основан на совершенно эмпирическом представлении результатов наблюдения, потому что прямой результат измерений состоит в следующем: при М показание барометра есть H, при V_1 оно меньше этого на y_1, при V_2 на y_2 и т. д. Вопрос состоит в том, каково же будет показание барометра при $V = \infty$, то есть как велика будет разность в показаниях барометра при том обстоятельстве, когда объем пустоты будет бесконечно велик, и того показания H, которое получилось при объеме M? Очевидно, что для решения этого вопроса приходится эксполировать, то есть находить некоторую величину вне пределов наблюдения. Не зная истинного закона, мы конечно не можем решить вопроса, не задавшись некоторою гипотезою. Гипотеза эта и состоит в том, что газ, находящийся в барометре, следует или Мариоттову закону, или уравнению $VP = a + bP$, по которым и производился расчет. Проверка этих гипотез может быть произведена двояким путем: во-первых, применяя ту и другую из них (или еще более сложную, полагая $VP = a + bP + cP^2$) к вычислению наблюдений над данным барометром. Если от применения обеих получаются поправки, одинаковые в пределах возможной погрешности наблюдения, то и можно считать, что поправка найдена с достаточной удовлетворительностью, и что можно простейшую из формул применять в наблюдениях этого рода. Второй способ проверки может состоять в том, что в двух или нескольких барометрах будут произведены поправки по той или другой формулам, и эти барометры будут сличаться при разных объемах пустоты в течение некоторого времени друг с другом; исправленные показания их должны быть согласны до пределов точности наблюдения, если способ расчета удовлетворителен;[2] этого согласия может не быть, если примененная гипотеза далека от истины.

---

[1] Так как $c = K_1$ и $d = K_0$, то для нахождения y_1 при $V = \infty$, эти величины должно подставить в выражение для PV и взять его с противным знаком (ибо при $V_1 = \infty$ высота барометра, очевидно, будет более, чем при $V_1 = V_0$, а y_1 = высоте при V_0 — высота при V_1), тогда получим $y_1 = -x = K_2$, так что K_2, необходимое из опыта и взятое с противным знаком, при этом способе расчета прямо дает поправку при избранном объеме V_0, то-есть $x = -K_2$.

[2] Способ сличения с нормальным барометром, который столь общеупотребителен для выверки барометров, в сущности основан на применении этого второго способа. К сожалению, истинные поправки на упругость воздуха, оставшегося в пустоте, для нормальных барометров метеорологических обсерваторий или не находятся вовсе, или находятся с недостаточным ручательством за точность результатов.

Оба упомянутые способа применены мною для убеждения в достаточности поправок, находимых по Мариоттову закону; для барометров, содержащих в пустоте малые количества газов, и они показали, что для таких барометров можно довольствоваться первым приближением, то-есть законом Мариотта. Часть этих данных приводится вслед за сим. Другие наблюдения над барометрами, нарочно изготовленными с значительным содержанием газов в пустоте (при наибольшем объеме поправка была от 1,0 и до 2,5 мм.), показали, что для этих последних, в пределах точности наблюдений, нельзя довольствоваться первым приближением, а должно прибегнуть к расчету, основанному на допущении линейных отступлений от закона Мариотта. Я считаю преждевременным и излишним излагать здесь эти последние наблюдения, тем более, что вопрос об отступлениях от Мариоттова закона при самых малых давлениях я предполагаю решить опытным путем и во всяком случае к нему возвращусь в дальнейшем изложении; а для практической цели — нахождения барометрической поправки — упомянутые наблюдения имеют малое значение, потому что при них нарочно оставлялось в барометре такое, сравнительно, значительное количество воздуха, какого в действительности в барометрах, выполненных с некоторыми предосторожностями, никогда не бывает.

§ 47

Прежде чем приведу данные, показывающие, что, в пределах точности наблюдений, можно для расчета поправки барометров руководствоваться законом Мариотта, считаю необходимым войти в некоторые практические подробности, ибо от них существенно зависит достоинство результата, как видно из примеров, взятых мною случайно из многих имеющихся в распоряжении. При выборе я руководствовался только одним желанием — показать примеры разнообразных практических приемов наблюдения и расчета, которые применялись мною на деле.

Часть наблюдений, приведенных далее, произведена была в условиях, благоприятных для получения точного результата, потому что для них был взят барометр, состоящий из двух барометров, соединенных (спаянных) между собою вверху так, что в обоих барометрах имеется наверху одно общее пустое пространство, сифонные же ветви обоих барометров разделены и независимы друг от друга. Система устройства [1] каждого из этих двух барометров соответствует описанию, данному в § 42 и рис. VII—2. Выгода для изучения вопроса, представляющаяся при таком двойном барометре, состоит в том, что в нем можно изменять объем пустоты, не изменяя положения ртути в наблюдаемом барометре, а потому все наблюдения можно произвести, не переменяя положения и расстояния труб катетометра, направлен-

[1] В дальнейшем изложении барометр этот будет описан и дан будет его рисунок. Нумера, под которыми означены у меня эти барометры, суть *n*° 7 и *n*° 8. Об этом барометре выше упомянуто в § 45.

ных на верхний и нижний мениски барометра. При такой неизменности труб, служащих для отчета, достигается наибольшая его точность, потому что направление оптической оси трубы тогда вовсе не изменяется. Малые изменения в положении менисков при этом определяются окулярным микрометром, а потому точность отчета для разностей y_i (см. предшествующий § 46) равняется чувствительности микрометра. При том (около 350 мм.) расстоянии менисков ртути от объектива трубы, какое был в этих определениях, каждое (из 100 делений, составляющих целый оборот микрометрического винта) деление микрометра отвечало для верхней трубы 0,00412, а для нижней 0,00437 миллиметра, а так как установка нитей микрометра не представляет погрешности большей 0,5 деления, то точность отчета по отношению к измерению y_i должно принять $= 0{,}005$ мм. Большей погрешности должно было ждать от капиллярности, хотя барометрические трубки имеют диаметр от 22,7 до 21,9 мм., но для уменьшения возможной погрешности этого рода при всех наблюдениях отчет производился при падении мениска (см. § 43), а потому и эта погрешность здесь была мала. Действительно при диаметре в 20 мм. вся капиллярная депрессия при высоте мениска в 1,8 мм. (а при падении менисков — высота их меньше этой) не более 0,034 мм., судя по таблице Поля и Шабуса, и разность депрессий, конечно, впадает в пределы погрешности наблюдения. Итак наблюдения при двойном барометре давали прямо величины y_i, то есть разности высот барометра при разных V_i емкостях пустоты, с точностью не меньшею 0,01 мм.[1] Такой степени точности в наблюдениях обыкновенных барометров при разных емкостях пустоты ждать нельзя по одному тому, что при их наблюдении необходимо передвигать трубы катетометра, что влечет за собою неизбежно новые погрешности, как это будет разобрано в главе «О катетометрах».

В каждом из двух соединенных барометров верхние части (высотою около 470 мм.) их разделены на кубические сантиметры, число которых в каждом $= 200$. Емкости эти были проверены предварительною калибрациею, и небольшая найденная при этом поправка вводилась в расчет при определении V_i. Верхняя соединительная часть обоих барометров, не снабженная делениями (ибо в ней нельзя делать наблюдений за отсутствием цилиндричности), имеет емкость 9,3 куб. сант., а потому, доведя в одном барометре ртуть до верхней черты, емкость пустоты можно менять около от 10 куб. сант. до 210 куб. сант., то-есть в 21 раз. В действительности [2] ртуть в наблюдаемом барометре стояла ниже верхней черты, так что емкость пустоты менялась от 16,7 до 214,2 куб. сант., то-есть в отношении 1 : 12,8. В обыкновенных барометрах нельзя столь значительно изменять емкость пустоты, а потому здесь лучше, чем в них, можно было следить за изменением упругости с переменою объема газа, оставшегося в пустоте.

---

[1] Возможная погрешность 0,005 отчета здесь удвоена, потому что отчет производится на двух менисках и в каждом отчете можно ждать погрешности 0,005 мм.

[2] По причине чисто случайной невозможности освещения нижнего мениска при самом верхнем положении ртути в наблюдаемом барометре.

С описанным барометром [1] было сделано несколько определений поправки по разным способам. Я приведу сперва в подробности данные одного из наблюдений (27 авг. 1874 г.), произведенных от полудня до 12 ч. 40′. В течение этого времени производились по временам наблюдения над другим (дифференциальным) [2] барометром. Они показали, что *за это время* с точностью до 0,017 мм., можно считать изменение давления воздуха, выражаемым уравнением:[3]

$$H_t = H_0 - 0{,}0023\ t,$$

где H_t есть давление во время t, H_0 есть давление во времени, от коего считается t, и t есть число минут от того, когда давление было H_0, до того времени, когда оно было H_t. Это *выражение для времени* справедливо от 12 ч. до 12 ч. 40′. Все наблюденные высоты барометра были на основании этого выражения для времени приведены к среднему времени, а именно к 12 ч. 20′, дабы отнести все показания к одному внешнему давлению. Притом для наблюдаемого барометра в 12 ч. 1′ абсолютная величина давления выражается при $V_1 = 16{,}7$ куб. сант. столбом ртути $= 752{,}92$ мм.[4] при 17°,80, что при 0°, $V = 16{,}7$ и $t = -19'$ дает $H_t = 750{,}52$, откуда при 0°, $V = 16{,}7$ и $t = 0'$ (то-есть в 12 ч. 20′) получаем по предшествующему выражению $H_0 = H_t - 0{,}0023.\ 19 = 750{,}48$ мм.

Самые наблюдения, произведенные вместе с М. Л. Кирпичевым, состояли в следующем. Сперва ртуть в наблюдаемом барометре была доведена до возможного верхнего положения и близ этого положения она оставалась в нем во все время наблюдений. В другом (соединенном с наблюдаемым) барометре ртуть первоначально доведена была до верхнего своего положения и объем пустоты отчиган. Тогда центральные (то-есть неподвижные) нити двух труб катетометра были установлены на вершины менисков наблюдаемого барометра, замечены были время определения и температура в барометре. Потом из второго барометра была выпущена часть ртути и замечены были: объем пустоты, время наблюдения и положение вершин обоих менисков наблюдаемого барометра, то есть было определено происшедшее изменение высоты барометра. Затем еще выпускалась ртуть и делались такие же наблюдения. Когда был достигнут наибольший объем пустоты во втором ба-

[1] В том состоянии, в каком он оказался после лета 1874 г. На стр. 107 [= 383] было упомянуто, о барометре *n*° 7 и 8, как о безвоздушном, и указано было, что он после того оказался с содержаним воздуха. В этом состоянии он и был исследован сперва 27 авг. 1874. Числа, полученные при этом исследовании, приведены далее.

[2] Описание таких барометров и способа их наблюдений помещено в следующей главе.

[3] Взятое наблюдение потому, вероятно, в результате и дает числа с значительною погрешностью (вероятная $= \pm 0{,}02$), что в давлении воздуха на этот раз замечались большие колебания и неправильности, редко встречающиеся.

[4] Эта величина 752,92 мм. наблюдена прямо на шкале катетометра, без поправки на ее расширение, ибо в опытах, для коих назначены наблюдения, не было нужды в особенной точности определения абсолютных величин. Коэффициент расширения шкалы $= 0{,}000018$, а поправка к нормальному метру при 20° $=$ $= 0{,}075$ мм.

рометре, в него приливалась ртуть и объем сокращался до первоначального, причем делались соответственные отчеты: объема, времени и положения мениска.

Времена девяти произведенных наблюдений были следующие, считая от полудня:

1′ 6′ 10′ 14′ 18′ 22′ 28′ 32′ 39′

Так как все наблюдения отнесены к 12 ч. 20′, то значения t для поправки, относящейся ко времени, суть:

$t = -19'\ -14'\ -10'\ -6'\ -2'\ +2'\ +8'\ +12'\ +19'$

Поэтому поправка (в миллиметрах) на время наблюденных высот, относя все наблюдения к 12 ч. 20′, будет $+0{,}0023\ t$, а именно: [1]

I) $-0{,}044\ -0{,}032\ -0{,}023\ -0{,}014\ -0{,}005\ +0{,}005\ +0{,}018$
$+\ 0{,}028\ +0{,}044$

Прибавляя эти величины к наблюденным высотам, получим те высоты, которые были бы тогда, если бы все определения были сделаны в 12 ч. 20′. Первоначальное расстояние менисков в наблюдаемом барометре было, как упомянуто выше, = 752,92 мм. Оно отвечает времени $t = -19'$; при других наблюдениях к этой высоте должно, судя по отчетам верхнего и нижнего микрометров, переведенным на миллиметры,[2] прибавить следующие величины:

II) $0{,}000\ +0{,}626\ +0{,}890\ +1{,}013\ +1{,}023\ +0{,}980\ +0{,}812$
$+0{,}578\ -0{,}030$

В 12 ч. 1′ термометр при барометре показывал 17°, 80, в 12 ч. 40′ его показание было 18°,05, поэтому для перевода наблюденных высот (= 752,92 + II) ртути к 0° должно принять температуру изменяющеюся пропорционально времени, а тогда получаются соответственные температуры:

17°,80 17°,83 17°,86 17°,88 17°,91 17°,93 17°97, 18°,00 18°,04

Поэтому соответственные поправки на температуру ртути, если привести ее высоты к 0°, суть:

$-2{,}4\ 04\ -2{,}409\ -2{,}415\ -2{,}419\ -2{,}423\ -2{,}427\ -2{,}430\ -2{,}432$
$-2{,}435$

Температуры шкалы [3] не были на этот раз непосредственно наблюдаемы, но об изменении расстояния центров труб, происшедшем от нагревания катетометра, можно сделать суждение потому, что по окончании опытов, когда объем пустоты был доведен до первоначального,

---

[1] Ибо $H_0 = H_t + 0{,}0023\ t$, где H_t есть высота, наблюденная во время t.

[2] Способ превращения указан в главе «О катетометрах».

[3] Поправка на калибрацию шкалы и отнесение к нормальному метру должны быть сделаны в величине первоначальной высоты.

оказалось необходимым, после введения всех других поправок (на время и температуру ртути), изменить расстояние труб на 0,04 мм. Поправка этого рода, введенная в других наблюдениях, но здесь не примененная, может быть устранена, взяв среднее из данных, относящихся приблизительно к равным объемам, ибо они относятся ко временам, расположенным почти вполне симметрически около среднего времени (12 ч. 20′). При этом предполагается, что длина шкалы изменялась все время равномерно. Сумма всех предшествующих поправок есть:

—2,444 —1,815 —1,548 —1,420 —1,405 —1,442 —1,600
—1,826 —2,421

Объемы пустоты в кубических сантиметрах, судя по наблюденным положениям верхних менисков обоих барометров и по предварительной калибрации, суть:

V = 16,5 41,8 78,3 135,8 214,3 135,8 78,3 39,8 16,7

Взяв средние из наблюденных, исправленных на время и температуру, высот барометра, отвечающих близким объемам, имеем, как результат наблюдения:

При	объеме	пустоты	16,6	куб.	сант.	высота	барометра	750,485	мм.
„	„	„	40,8	„	„	„	„	751,100	„
„	„	„	78,3	„	„	„	„	751,346	„
„	„	„	135,8	„	„	„	„	751,489	„
„	„	„	214,3	„	„	„	„	751,515	„

Среднюю степень погрешности этих высот, как и всех наблюдений подобного рода, при тех приемах наблюдения, которые применяются в этих определениях, должно принять около ±0,02. Только при особо благоприятных условиях наблюдения можно ждать погрешности меньшей, чем указанная, ибо достаточно сделать в определении температуры ртути погрешность в 0°,1, чтобы иметь уже в барометрической высоте погрешность 0,013 мм., а при обычном способе наблюдения не только такая температурная погрешность, но и гораздо большая возможны. Катетометрические, особенно столь скорые наблюдения, как барометрические, при всех предосторожностях могут заключать погрешность, достигающую до 0,015 мм. Поправка на время также сопряжена с погрешностями, особенно в тех наблюдениях, в продолжение коих барометрическая высота меняется быстро. Так нередко в течение одного часа высота барометра меняется на 1—2 мм., а тогда, установив одну из труб для наблюдения высоты мениска, заметим уже перемену в то время, какое необходимо для установки другой трубы.

Перейдем теперь к нахождению поправки нашего барометра на основании вышеприведенных чисел, а именно, будем искать поправку, которую должно ввести в наблюдение, когда объем пустоты = 200 куб. сант. Сперва найдем ее, приняв закон Мариотта точным. По нему $V_i E_i = C$, постоянному числу, которое и должно отыскать для нашего

барометра. Если оно будет известно, то $\frac{C}{200}$ будет искомая поправка при объеме 200 куб. сант. Поправка E_i, или упругость газа в пустоте при объеме V_i, очевидно, равна неизвестному B, истинному барометрическому давлению, без наблюденной высоты H_i, то есть $E_i = B - H_i$, а потому:

$$V_i(B - H_i) = C,$$

откуда и найдем, имея два или более наблюдения, искомые B и C. На основании предшествующих опытов составляем пять таких уравнений:

$$\begin{aligned} 16{,}6(B - 750{,}485) &= C \\ 40{,}8(B - 751{,}100) &= C \\ 78{,}3(B - 751.346) &= C \\ 135{,}8(B - 751{,}489) &= C \\ 214{,}3(B - 751{,}515) &= C \end{aligned}$$

Для удобства расчета примем $B - 750 + x$, тогда получаем:

$$\begin{aligned} 16{,}6x - C &= 8{,}051 \\ 40{,}8x - C &= 44{,}880 \\ 78{,}3x - C &= 105{,}392 \\ 135{,}8x - C &= 202{,}206 \\ 214{,}3x - C &= 324{,}665 \end{aligned}$$

а отсюда по способу наименьших квадратов [1]

$$x = 1{,}612 \text{ или } B = 751{,}612. \quad C = 19{,}570.$$

Приняв V_iE_i за постоянное $= 19{,}57$, найдем для

$$V_i = \quad 16{,}6 \qquad 40{,}8 \qquad 78{,}3 \qquad 135{,}8 \qquad 214{,}3$$

следующие значения упругостей или поправок наблюденных барометрических высот:

$$E_i = \frac{19{,}57}{V_i} = \quad 1{,}178 \qquad 0{,}480 \qquad 0{,}250 \qquad 0{,}144 \qquad 0{,}091$$

Приложив эти величины к наблюденным H_i, получаем следующие значения:

$$B = 751.663 \quad 751.580 \quad 751{,}596 \quad 751{,}633 \quad 751{,}606$$

---

[1] По нему:

$$B = A + \frac{n\sum hV^2 - \sum V \sum hV}{n\sum V^2 - (\sum V)^2}$$

$$C = \frac{\sum V \sum hV^2 - \sum V^2 \sum hV}{n\sum V^2 - (\sum V)^2},$$

где n есть число данных, h — разность наблюденных давлений от условного A, а именно $h = H_i - A$, знак $\sum$ есть знак суммы.

Среднее значение 751,615 вполне отвечает выше найденному. Отступления найденных значений от среднего:

$$+0{,}048 \quad -0{,}035 \quad -0{,}019 \quad +0{,}018 \quad -0{,}009$$

Они показывают, что вероятная погрешность отдельного наблюдения $= \pm 0{,}022$, а среднего (считая число всех наблюдений за 5) числа $= \pm 0{,}010$, если всю погрешность перевести на наблюдения давлений.

В действительности часть погрешности зависит от измерения объемов, а неточности в этом отношении должны оказывать наибольшее влияние при малых объемах, поэтому замечаемая при них значительная погрешность находит свое объяснение.

Описанный пример, как и другие, далее приводимые, взят мною случайно из имеющихся наблюдений и принадлежит к числу таких, где погрешности наблюдения довольно значительны. В большинстве других наблюдений этого нет, в чем убеждаемся повторением одних и тех же наблюдений несколько раз и сличением результатов. Для примера привожу определение поправки того же самого барометра, произведенное с ним двукратно после того, как он был исправлен по способу, описанному на стр. 102 [= 372] § 42.

§ 48

Определение, сделанное 18 сентября, производилось при давлении около 485 мм., когда открытая ветвь барометра была сообщена с большим сосудом, содержащим несколько разреженный воздух. Температура этого воздуха удерживалась постоянною, а на изменения, не превышающие однако сотых долей градуса, производилась поправка, равно как и на изменение давления от малой перемены объема газа, зависящей от изменения в положении манометра. Способ этот устраняет неточность, происходящую от определения переменного давления воздуха, а потому дает числа, более между собою согласные, чем при сообщении барометра с атмосферою. Так как в конце опыта достигнуто было то же давление, какое было в начале, то получилась уверенность в том, что сообщение было герметично, для чего служили также и предварительные опыты. Всех определений было 11, началось определение с наибольшего объема пустоты, при наименьшем объеме сделано одно определение. Произведя все необходимые поправки, как было указано в предшествующем опыте, и взяв среднее, получено:

$V_i =$	208,5	112,5	62,5	37,5	24,6	12,75
$H_i =$	484,410	484,323	484,209	484,007	483,793	483,220

Из этих данных возьмем, дабы придать всем числам возможно одинаковый вес, пять первых по два раза, ибо эти данные суть средние из двух наблюдений, а последнее наблюдение возьмем один раз. Решая, как в предыдущем определении, по закону Мариотта и способом наименьших квадратов, находим:

$$B = 484{,}491; \quad C = 17{,}437$$

Отсюда по C находим значения B из каждого опыта:

484,494 484,478 474,488 484,472 484,502 484,588

Среднее значение [1] $B = 484{,}496$, а отступления от вероятнейшего числа:

−0,003 +0,013 +0,003 +0,019 −0,011 −0,097

Поэтому вероятная погрешность каждого из 11-ти наблюдений = $= \pm 0{,}030$, а среднего из них = $\pm 0{,}009$.

Если расчесть по этим наблюдениям упругости, приняв истинную высоту = 484,491, то произведение из объемов на давления (принятое выше за постоянное = C) суть:

Упругость $E_i = 0{,}081$ 0,168 0,282 0,484 0,698 1,271

Произведение $E_i V_i = 16{,}89$ 18,90 17,63 18,18 17,17 16,21

Среднее значение из 3-х первых определений = 17,81, а из последних [2] = 17,38.

Эти и многие ему подобные сличения показывают, что, в пределе точности наблюдений, для нахождения барометрической поправки можно допустить справедливость Мариоттова закона. Для окончательного в том убеждения найдем для вышеприведенного случая истинное давление в том, чисто эмпирическом предположении, что упругость газа в барометре при больших разрежениях следует той же эмпирической законности, какой она следует и при меньших объемах, а именно определим, какая была высота ртути, если бы объем газа был равен бесконечности, то-есть, найдем эмпирическую зависимость H_i от V_i, предполагая в виде второго приближения, что:

$$H_i = B - \frac{C}{V_i + a}$$

При $V_i = \infty$ очевидно, что $H_i = B$, то есть B есть искомая высота при бесконечно большом объеме. Здесь три неизвестных B, C и a. Взяв данные для $V_i = 208{,}5$; 62,5 и 24,6 куб. сант., находим:

$$B = 484{,}498 \quad C = 18{,}61 \quad a = 1{,}8$$

Найденное этим путем B так мало (на 0,007 мм.) отличается от выше найденного значения его, что из этого очевидна недостаточность прямого расчета по Мариоттову закону (по коему $a = 0$) для определения поправки на давление. Подставляя тотчас найденные величины для B, C и a в формулу, находим для остальных (кроме взятых) V_i следующие значения H:

	$V_i = 112{,}5$	37,5	12,75
Вычисленное H_i	$H_i = 484{,}335$	484,025	484,219
Разница от наблюденного	$H_i = -0{,}012$	−0,018	+0,001

[1] Взяв опять 5-ть первых данных по два раза.

[2] Взяв 18,18 и 17,16 по два раза, а 16,21 один раз, судя по способу наблюдения.

Таким образом все (а именно 11) наблюдения выражаются формулою:

$$H_1 = 484{,}498 - \frac{18{,}61}{V_1 + 1{,}8}$$

с точностью, гораздо бо́льшею, чем формулою, основанною на Мариоттовом законе (а именно здесь вероятная погрешность отдельного определения $= \pm 0{,}010$, а среднего $\pm 0{,}003$, а там для отдельного определения $\pm 0{,}030$, а для среднего $\pm 0{,}009$ мм.). Это показывает: 1) что есть практический повод признавать неточную применимость Мариоттова закона даже при столь малых давлениях, какие существуют в торичеллиевой пустоте,[1] но отступления эти принадлежат к числу мало влияющих на окончательный, искомый результат, то есть на поправку барометра при значительном объеме пустоты, ибо при $V = \mp 200$ (в данном случае при этом объеме и нужно было знать поправку) по первому способу она $= 0{,}087$, а по второму $= 0{,}093$, разность их 0,006 впадает в неизбежные погрешности определений. 2) При том способе наблюдения, какой применен здесь, а именно при соединении барометра с сосудом, где находится воздух определенной массы, упругости и температуры, и при наблюдении изменений давления без перемены места трубы, достигается такая степень точности результата ($\pm 0{,}003$), какой другие способы (при соединении с атмосферою и даже при введении поправки на время, при изменении положения столба ртути и труб, служащих для отчета) дать не могут. Это видно из всей совокупности данных, имеющихся в моем распоряжении. По этой то причине я считаю наиболее надежным предложенный мною выше способ нахождения барометрической поправки, соединяя открытую ветвь барометра с сосудом, где температура и объем, а следовательно и упругость запертого воздуха остаются постоянными.

§ 49

Примеры, разобранные в двух предшествующих параграфах, показывают способ нахождения барометрической поправки, при помощи наблюдения дифференциального барометра и при помощи сосуда с га-

[1] Природа тех отступлений от Мариоттова закона, которые открываются при изучении барометров вышеописанным способом, такова однако, что ее можно объяснить сгущением на поверхности стекла или ртути или диссоциациею последней (§ 39). Представив себе существование сгущения мы должны ждать при увеличенном давлении уменьшения количества газа, ибо тогда часть его сгустится (поглотится) поверхностью, а потому при увеличении давления произведение из объема на давление должно уменьшиться. Оно так обыкновенно и выходит, как я находил многократно. То же должно быть и тогда, когда окисел ртути будет диссоциировать при малом давлении. Такой же род отступлений вышел и в разбираемом определении. Преобразуя вышеприведенную формулу и называя чрез P упругость газа в пустоте, то есть $B - H_1$, мы имеем $PV = 18{,}61 - 1{,}8P = 18{,}16\ (1 - 0{,}1P)$. Так при $P = 0{,}088$ значение PV по данным опыта $= 18{,}35$, по формуле $= 18{,}45$; при $P = 1{,}278$ значение PV по опыту $= 16{,}27$, по формуле $= 16{,}31$. Способы наблюдения, и особенно ничтожность массы газа при большой поверхности поглощения, делают данные этого рода непригодными для точного суждения о применимости Мариоттова закона к разреженным газам.

зом постоянной упругости. Эти способы, особенно последний, наиболее надежны, но нередко их нельзя применить, а потому привожу еще два других случайно взятых примера, в коих определение производилось при сообщении с воздухом, а изменение его давления находилось по наблюдению второго, добавочного барометра или по данным того же самого барометра. Оба примера относятся к одному и тому же баромanometру (*n*° 4), многократно испытанному мною вместе с М. Л. Кирпичевым. Первый пример относится к 13 января 1874 года, а второй к 4-му марта 1874 года. До этого последнего времени все испытания давали постоянно одну и ту же поправку (*C* = от 7 до 9, выражая упругость мм. ртутного столба, а объем куб. сант.), а в первых числах марта в барометрическую пустоту, по обстоятельствам опытов, взошел пузырек газа, а потому сделан был ряд новых определений, показавших, что поправка (*C* около 11), то есть упругость газа в пустоте заметно увеличилась.

При выражении упругостей барометром, о котором идет теперь речь, была принята температура 17°,5 за нормальную и высоты столбов ртути приводились к этой последней температуре.

В опыте 13 января вместе с барометром *n*° 4 наблюдался барометр *n*° 3. Прямые наблюдения, исправленные на температуру ртути (17,5), но не на упругость воздуха в пустоте, для него дали следующие числа, приняв 1 час (пополудни) за 0′.

Время t	−82′	−64′	−37′	−4′	+18′	+45′	+67′
Высота H_t	748,11	748,32	748,51	748,75	748,93	749,04 (?)	749,38

Эти данные довольно хорошо выражаются линейною формулою

$$H_t = 748{,}79 + 0{,}008t.$$

Действительно, по этой формуле получаются значения:

H_t = 748,13 748,28 748,49 748,76 748,93 749,15 749,33

Другие ряды наблюдений с *n*° 3 показали, что в нем ртуть не чиста и легче чистой, так что показания *n*°3 выше надлежащих, но он применялся часто по той причине, что в нем диаметр, равный 35 миллиметрам, позволяет не обращать внимания на капиллярность, а для изменения давления по времени и нет нужды в абсолютной высоте барометра. Поэтому наблюдения *n*° 3 показывают только одно уравнение времени, каким можно воспользоваться для поправки данных для *n*° 4-го. Эти последние наблюдались при двух объемах пустоты. Больший объем был 144 куб. сант. Для него получено 4 данных:

Время t =	−74′	−26′	+37′	+75′	
Высота H'_t =	748,02	748,50	748,91	749,36	мм.

По уравнению времени находим высоту в 1 час, то есть когда $t = 0$, вводя поправку $-0{,}008t$.

H'_0 = 748,61 748,71 748,61 748,76

Среднее значение $= 748{,}67 \pm 0{,}03$ представляет довольно значительную вероятную погрешность, зависящую от совокупности многих причин, а особенно от того, что наблюдения значительно удалены друг от друга по времени.

Другой объем, при коем сделаны были определения, был $= 68$ куб. сант. При нем сделано было три наблюдения:

$t =$	$-50'$	$+10'$	$+55'$
$H_t'' =$	748,19	748,62	749,08

Пользуясь уравнением времени, получаем:

$H_0'' =$	748,59	748,54	748,64

Среднее значение $H_0'' = 748{,}59 \pm 0{,}02$. При объеме пустоты 68 ртуть в открытой ветви барометра поднялась на 243 мм., а потому давление уменьшилось на 0,02 мм. противу того, каким было оно при объеме пустоты $= 144$ куб. сант., а потому давление при $V = 68$ куб. сант. равно 748,61. Итак в барометре $n°$ 4 при $V = 144$ упругость была $B -$ $- 748{,}67$, а при $V = 68$ упругость $= B - 748{,}61$, если чрез B означим истинную высоту барометра. По закону Мариотта имеем:

$$C = 68\,(B - 748{,}61) = 144\,(B - 748{,}67).$$

Откуда $B = 748{,}72$ и $C = 7{,}7$. Для сличения привожу результат, полученный с $n°$ 4 в некоторых других опытах, ранее того произведенных.

5 декабря	1873 г.	$H_0' - H_0'' = 0{,}07$	$C = 9{,}0$ [1]	$x = 0{,}09$
8 января	1874 г.	$H_0' - H_0'' = 0{,}06$	$C = 7{,}3$	$x = 0{,}07$
9 „	„	$H_0' - H_0'' = 0{,}06$	$C = 7{,}9$	$x = 0{,}08$
13 „	„	$H_0' - H_0'' = 0{,}06$	$C = 7{,}7$	$x = 0{,}08$

При том ряде наблюдений, какой дан в рассмотренном примере, нельзя ждать всей возможной точности результата, но располагая по возможности соответственные наблюдения симметрически по отношению ко времени, избранному за среднее, можно устранить большинство возможных погрешностей. Так, например, в опытах этого рода необходимо наблюдателю долго и часто быть вблизи барометров и прибегать к прилитию и отливанию ртути, а тогда температурная поправка становится мало точною, в среднем же результате влияние погрешности этого рода должно исчезать, как видно и по вышеприведенным данным, показывающим, что до 2-х или 3-х сотых миллиметра можно ручаться за средний результат определения высоты барометра, судя по всем наблюдениям, сделанным в течение 2—3-х часов, а в поправке, находимой такого рода наблюдениями, погрешность отнюдь не более 0,02 мм.

---

[1] Значение C (которое равно произведению объема на упругость), характеризующее барометр, находится, если известна разность $H'-H''$ барометрических высот при объемах пустоты V' и V'', ибо $C = (H'-H'')\,\frac{V'V''}{V'-V''}$. Чрез x в этой таблице и называю поправку при объеме пустоты $= 100$ куб. сант.

Наблюдения 4-го марта были произведены с одним барометром и дали при $V' = 80{,}0$ куб. сант. следующие высоты во времени, считая от 11 ч. 36′:

Время	$t =$	−35′	−10′	+11′	+34′
Высота	$H'_t =$	758,713	758,767	758,957	759,040

При объеме $V'' = 44{,}2$ куб. сант. получены данные:

Время	$t =$	−23′	0′	+24′
Высота	$H''_t =$	758,594	758,765	758,849.

Эти данные показывают, что среднее изменение барометра на каждую минуту было $= +0{,}0056$, а потому поправка на время $= -0{,}0056t$. Введя ее, получаем для

$V = 80{,}0$ $H'_0 = 758{,}909;$ 758,823; 758,895; 758,850
$V = 44{,}2$ $H''_0 = 758{,}723;$ 758,765; 758,715.

Исправляя H''_0 на разность высот (около 120 мм., поправка 0,011 мм.) и взяв среднее, получаем:

$$H'_0 = 758{,}869; \quad H'_0 = 758{,}745; \quad H' - H'' = 0{,}124.$$

Отсюда

$$C = (H'_0 - H''_0)\frac{V'V''}{V' - V''} = 12{,}2$$

§ 50

Вышеизложенное по отношению к барометрам сводится к следующим выводам, которыми я и руководствовался в своей работе об упругости газов:

1) Сифонные барометры с широкими (более 15 мм. диам.) трубками представляют наибольшие выгоды относительно точности наблюдения.

2) Абсолютной пустоты в точных барометрах, допускающих ясный отчет, еще ни разу не удалось сохранить, а потому все наблюдения с барометрами должны быть исправлены на упругость газов в, так называемой, торричеллиевой пустоте.

3) Для этой цели можно, в пределах неизбежных погрешностей (достигающих 2-х—3-х сотых миллиметра) наблюдения, пользоваться законом Мариотта, хотя точнейшие данные и не удовлетворяют ему.

4) Для характеристики барометра служит то постоянное (C = произведению из упругости на объем), которое находится путем наблюдения изменения упругости с переменою объема пустоты.

5) Наблюдения этого рода точнее всего производятся, если герметически соединять барометр с сосудом, в коем объем и температура, а потому и давление, остаются постоянными.

6) Для удобства наполнения, испытания и, в случаях надобности, исправления лучше всего в верхней части барометра иметь нисходящую капиллярную трубку, опущенную во ртуть и служащую для удаления последних следов воздуха из пустоты.

7) Ртуть, перегнанная в приборе Вейнгольда, должна считаться единственно пригодною для точных барометров по ее чистоте и постоянству.[1]

8) Для уменьшения капиллярной погрешности не только должно брать широкие трубки, но и производить отчет только после медленного выливания ртути, для чего сифонную ветвь барометра должно снабжать боковою трубкою для приливания и отливания ртути.[2]

9) Для точности поправки на температуру ртути и шкалы весьма важно, особенно при частых наблюдениях барометра, окружить его трубкою с водою, протекающею также чрез трубчатую шкалу, с коею производится компарация барометрической высоты.

10) Так как нет еще средств приготовить пригодные для точных наблюдений, совершенно безвоздушные барометры ($C = 0$), то для уменьшения поправки $\left(= \frac{C}{V}\right)$ весьма полезно в нормальных барометрах иметь вверху большую барометрическую камеру (чтобы V было значительно). Наполнение таких барометров при помощи нисходящей капиллярной трубки не представляет никаких новых трудностей.[3]

---

[1] В дальнейшем изложении будут приведены данные для свойств этой ртути.

[2] Это приспособление дает, кроме того, возможность: a) легко наполнять барометр; b) доводить емкость пустоты при наблюдениях всегда до одинаковой, а потому иметь одну поправку на упругость; c) в бароманометрах позволяет в манометрической ветви держать один и тот же уровень, что важно для наблюдений над газами; d) легко производить наблюдения для определения поправки на пустоту и т. п.

[3] Считаю не излишним упомянуть здесь о совокупности поправок, которые должно сделать с данною B высотою, наблюденною на барометре (предполагая устройство по системе Фортена), снабженном правильно деленною шкалою, чтобы получить истинное давление H в миллиметрах. Совокупность поправок выразится формулою:

$$H = \frac{a + bB}{1 + (K - k)(T - t + d)} + \frac{c}{1 - H} + (h_1 - h_2).$$

Здесь чрез a названо расстояние нуля шкалы при 0° от вершины нижнего мениска ртути (B = расстоянию от этого 0 до вершины верхнего мениска), b — есть значение одного деления шкалы в миллиметрах, также при 0°. Величины эти должны быть найдены прямым сравнением шкалы с нормальными мерами. K есть коэффициент расширения ртути = 0,000180, k — коэффициент линейного расширения шкалы, T — температура по термометру, t — поправка ее, находимая чрез сличения термометра с нормальным, d есть поправка на плотность ртути. Пусть, например, плотность ртути в барометре относится к плотности чистой ртути как $1 : 1 + (K - k)d$. Если бы ртуть была чиста, то вместо B наблюдалась бы высота

$$\frac{B}{1 + (K - k)\,d}.$$

Величина c предшествующей формулы есть постоянная, выше называющаяся чрез C (стр. 117 [= 395] и др.); e есть высота всего барометра вместе с пустотою, считая от 0 шкалы ,и предполагая вершину его плоскою; h_1 — есть депрессия верхнего и h_2 — нижнего менисков ртути, определяется из наблюдения высот менисков и диаметров трубок, в коих они образовались. Величина b нередко близка к 1, h_2 и d к 0, но прочие величины, служащие для поправки, обыкновенно значительны и ими нет никакого права пренебрегать, если желают иметь действительно понятие о давлении. Сложность необходимых поправок и *пропуск* некоторых из них объясняет то, что замечено во 2-й выноске § 10. Прямое и простое сличение исследуемого барометра с нормальным *не может дать* всех поправок для всех случаев, если не расположить сличения так, как того требует вышеприведенная полная формула поправок, данная для барометра системы Фортена.

В заключение этой главы необходимо сказать о закрытых манометрах. Если манометр высотою больше барометрической, то устройство его и наполнение ничем не отличаются от барометрических и в этом отношении применение нисходящей капиллярной трубки незаменимо, потому что при ней можно приготовить манометр какой угодно высоты, ибо не требуется перевертывать трубки со ртутью после ее наполнения, а она предварительно устанавливается в том положении, какое будет иметь впоследствии. Если затем, после выделения остатка воздуха, отпаять капиллярную трубку, то приготовленный по моему способу манометр будет иметь обыкновенный вид весьма высокого барометра с очень большою пустотою, что допускает определение значительных давлений. Но капиллярную трубку не следует отпаивать, ибо при ней легко вновь выгнать из барометрической пустоты газ, если он туда попадет.

При изготовлении закрытых манометров малой длины, служащих преимущественно для показания степени пустоты, достигаемой насосами, я применял тот же способ, как и для барометров с капиллярною трубкою. Способ наполнения изображен на рис. IV—3. *AB* есть манометр, снабженный капиллярною трубкою *DE*. Она при помощи мастики в *C* скрепляется с трубкою *F*, идущею к насосу. От него идет трубка *L* к склянке *G* со ртутью. В горле этой стклянки вставлены на мастике трубка *K* и стеклянная трубка с краном *H*. Чрез *K* проведена тонкая стеклянная трубочка *qnm*, доходящая как до дна стклянки, так и до дна открытой ветви *A* манометра. Места *a*, *b* и *d* залиты мастикою. Когда из стклянки и манометра выкачан (после полного высушивания) воздух, кран *H* запирается, трубка *c*, идущая к нему, запаивается и воздух чрез *H* впускается в стклянку. Тогда из *G* по *qnm* ртуть наполняет манометр. Во все это время насос продолжает работать. Когда ртуть в ветви *B* достигнет до *D*, она вытеснит остаток воздуха. Часть ртути перейдет тогда чрез *E* и *F* в насос (ртутный), а в это время скрепление *a* размастичивается, трубка вынимается и ветвь *A* соединяется с насосом. Во все это время из *A* части ртути перейдет в насос по трубке *E*. Когда в *A* образуется разреженное пространство, ртуть в *D* разрывается, часть упадет в *B*, другая в *E*. В этой последней тотчас поверх ртути капиллярную трубку можно запаять, при этом должно стараться оставить как можно большее количество трубки *E*. Впуская затем осторожно воздух в *A*, можно вытеснить весь остаток воздуха из *B* в *E*. В этой последней тогда поверх запаянного конца будет сперва пузырке воздуха, если он остался в манометре, а потом столб ртути. Он сдавит воздух, а потому при новом выкачивании воздуха из *A* воздух из *E*, если его там немного, не выйдет. Тогда, если желательно придать манометру обычную форму, наклонив весь манометр, можно из *D* слить часть ртути и в этом месте отпаять совершенно капиллярную трубку, хотя нет в том никакой нужды; отпаивание же, как было сказано в § 40, влечет за собою в сущности порчу манометра, ибо тогда в пустоте появляется газ.

Пятая глава

О дифференциальных барометрах

§ 51

Во многих физических, метеорологических и геодезических наблюдениях требуется в определении барометрических давлений с особою точностью знать их изменение с переменою времени или места. Такой случай часто представлялся в исследованиях, производимых мною над упругостью газов, если для определения ее взят был открытый манометр, ибо упругость газа тогда определяется суммою высот ртути в барометре и манометре. В начале опыта барометрическое давление определялось с возможною точностью нормальным барометром, а затем необходимо было знать прибыль и убыль этого давления, чтобы определить все давление, действующее на газ в известное время наблюдения открытого манометра. Если бы каждый раз, как это делалось до сих пор в наблюдениях над сжимаемостью газов, определять вновь барометрическое давление, то в каждое отдельное наблюдение вкралась бы двойная погрешность, происходящая от сложения погрешностей барометрического и манометрического наблюдения. Притом эти погрешности были бы весьма неодинаковы в отдельных наблюдениях одного ряда, тем более, что барометрическое наблюдение при помощи нормального барометра занимает значительное время, а атмосферное давление, особенно по временам, весьма быстро меняется. В таком случае необходимо бывает содействие особого наблюдателя для того, чтобы следить за изменением барометра, и все же погрешности каждого определения тогда друг от друга независимы и, следовательно, и абсолютная, и относительная их величина могут быть значительны. Для устранения таких неудобств весьма большую услугу оказало мне устройство дифференциального барометра, снабженного нефтяным манометром и показывающего изменение в давлениях с точностью, гораздо большею, чем та, которую можно достичь при помощи ртутных нормальных барометров; наблюдения с ним притом очень быстры. Такой прибор может быть полезен не только для тех целей, для которых он мною устроен, но и в других случаях, а потому в этой главе я опишу: во 1) принцип устройства и расчета дифференциального барометра; во 2) различные видоизменения в устройстве его, и в 3) упомяну о тех применениях, которые он может иметь в практике.

Основное начало устройства дифференциального барометра состоит в применении Мариоттова закона к малым изменениям атмосферного

давления. Принцип этот применялся уже прежде многократно для определения давлений, но, сколько мне известно, все попытки были мало успешны в отношении точности получаемых результатов, по той причине, что в сосуд, заключающий газ, вмещалось раз на всегда определенное количество газа и масса его считалась неизменною, тогда как в действительности с нею происходили изменения различного рода, в особенности в том случае, когда газ запирается жидкостью, иною, чем ртуть, и способною растворять газ. В этом случае масса газа могла или прибывать, или убывать при изменении давления. Кроме того, для чувствительности показаний подобного рода приборов употреблялась обыкновенно вода, а она представляет значительные изменения в упругости паров с изменением температуры. Для устройства моих приборов, как манометрическую жидкость я употребляю нефтяное масло, представляющее чрезвычайно малую упругость паров при обыкновенной температуре, как о том будет сказано далее. Такое масло в 15—16 раз легче ртути, а потому всякие изменения в давлении окажутся на манометре, наполненном нефтяным маслом, увеличенными в 15—16 раз против тех изменений, которые в то же время произойдут в ртутном барометре.

Сущность устройства моего дифференциального барометра состоит в следующем: представим сосуд, окруженный условиями для малой изменяемости температуры и снабженный двумя тонкими трубками. Одна трубка снабжена краном и, при помощи его, служит для сообщения сосуда с воздухом или для прекращения этого сообщения; другая трубка герметически соединена с манометром в виде буквы U, наполненным нефтяным маслом. Если при некотором давлении запереть кран прибора, то уровни нефтяного масла в обеих ветвях манометра будут на одной высоте. При увеличении давления в открытой ветви манометра нефтяное масло опустится, а в закрытой поднимется; при уменьшении давления произойдет обратное. Высота поднятия или разность уровней нефтяного масла в обеих ветвях манометра служит мерою изменения атмосферного давления сравнительно с тем давлением, которое было в момент запирания крана. Так как нефтяное масло в 15—16 раз легче ртути, то при помощи миллиметрической шкалы и лупы при ней, которыми снабжается нефтяной манометр, легко наблюдать изменения, достигающие до $^1/_{10}$ доли миллиметра в столбе масла, что соответствует в столбе ртути изменению давления уже в сотых и даже тысячных долях мм. (ибо 0,1 мм. масла = около 0.006 мм. ртутного столба), то есть при помощи прямого отчитывания лупою дифференциальным барометром достигается точность такая же, какой можно достичь только при помощи совершеннейших средств в определении барометрических давлений с помощью ртутного барометра. Если применить к определению высоты масла в дифференциальном барометре катетометр или другие точные средства для измерения высот, то точность в определении изменения давлений здесь будет по крайней мере в 15 раз большею, чем при определении изменения давлений столбом ртути. Если бы при изменении давления объем и температура воздуха, запертого в сосуде, оставались те же самые, то показание манометра непосредственно определило бы изменение давлений, но так как эти условия в совершенной точности

невозможно соблюсти и так как изменение температуры заключенного воздуха оказывает значительное влияние на изменение упругости, то необходимо при употреблении дифференциального барометра: во 1) с точностью наблюдать температуру как в момент запирания крана, так и при каждом следующем наблюдении; во 2) соблюдать все необходимые предосторожности для того, чтобы температура разных частей газа в сосуде была однообразна; в 3) чтобы вообще изменения температуры с течением времени совершались, по возможности, медленно и правильно и 4) чтобы объем газа или сохранялся первоначальный, или же было бы известно его изменение. В тех термометрах, которые употреблялись мною для дифференциальных барометров, градус разделен на 50 частей и при помощи лупы легко отсчитываются не только сотые, но и тысячные доли градуса, а потому относительное изменение в температурах определяется с надлежащею точностью, по мере погрешности прибора. В первых устроенных мною приборах такой термометр помещался во внутрь шарообразного резервуара для газа, так что шарик термометра соответствовал центру шара, заключающего воздух, а потому можно было думать, что термометр показывает действительно среднюю температуру газа. Впоследствии, когда для точности наблюдений и для уменьшения размеров дифференциального барометра оказалось полезным прибегнуть к водяным ваннам, термометр помещался рядом с резервуаром дифференциального барометра в общей водяной ванне, снабжаемой мешалкою для того, чтобы температура верхних и нижних частей была одинакова (известно, что при изменении температуры окружающего пространства верхние и нижние части сосуда с водою всегда имеют неодинаковую температуру). При дальнейшем описании разных видоизменений дифференциального барометра будут указаны те предосторожности, какие употреблялись мною для получения возможной равномерности температуры, а также те случаи и приемы, при коих термометрическое наблюдение устранялось.

При устройстве дифференциального барометра возможны два главных видоизменения: с переменным объемом газа и с постоянным. Если нефтяной манометр, сообщенный с резервуаром для воздуха, содержит определенное количество нефтяного масла, то при изменении атмосферного давления нефтяное масло в той ветви манометра, которая сообщена с резервуаром, будет подниматься или опускаться, а следовательно, объем воздуха, заключенного в резервуаре, будет изменяться. Такое устройство представляет наибольшую простоту и наиболее пригодно для простейших наблюдений, но для точности получаемых результатов оно требует, чтобы те изменения с объемом газа, которые совершаются в манометре, были не только известны, но и весьма малы сравнительно со всем объемом газа, иначе может произойти погрешность, превышающая точность отсчитывания, а потому, так как манометр нельзя сделать чрезвычайно узким, резервуару тогда необходимо придать более или менее значительные размеры. Первые резервуары, которые употреблены мною, и имели для этой цели емкость в 15, даже в 20 литров. Это составляет весьма важное неудобство не только для переноски прибора (с ванною), но и для защищения его от неравно-

мерности температуры, а потому впоследствии я стал чаще употреблять второй способ наблюдений, то есть при постоянном объеме газа. Устройство, примененное мною в этом случае, подобно тому, которое употребляется в воздушных термометрах для сохранения равенства объемов воздуха, заключенного в резервуаре термометра. Однако здесь нельзя, как это делается в ртутных манометрах, непосредственно приливать и отливать чрез воронку масло в открытую ветвь манометра, потому что объемы вливаемого масла малы и оно легко смачивает стекло и образует чрез то пузырьки воздуха, при прилитии прерывающие непрерывность масляного столба. По этой причине необходимо как прилитие, так и отливание нефтяного масла производить из нижней части манометра, но при этом невозможно употреблять ни краны, ни зажимы. Краны нельзя употреблять по той причине, что они запирают герметически только в том случае, когда смазаны салом, а это последнее растворяется в нефтяном масле; зажимы же с каучуковою трубкою нельзя употреблять здесь потому, что нефтяное масло разъедает каучук. Вследствие того для приливания и отливания масла употреблены мною другие способы, далее описанные и примененные мною потом в различных других приборах. При изложении теории прибора мы разберем сперва тот общий случай, когда объем газа, заключенного в резервуаре, изменяется при изменении атмосферного давления, потому что второй случай, представляющийся здесь, а именно наблюдение при постоянном объеме, составляет только упрощение первого случая. Практически важно заметить, что при сохранении постоянного объема нет необходимости в таких больших резервуарах для газа, как при переменном объеме, а потому тогда устройство всего прибора приобретает уютность и снаряд делается легче переносимым, что особенно важно при применении дифференциального барометра для нивеллирования.

§ 52

Сверх этих предварительных замечаний, считаю необходимым уяснить еще два обстоятельства, а именно: приготовление нефтяного масла для манометра и отличие употребленного мною устройства от тех, которые применялись до сих пор.

Нефтяное масло, употребленное мною, добыто из тяжелых продуктов перегонки бакинской нефти. В бытность мою на заводе для перегонки нефти В. А. Кокорева произведена особая дробная перегонка для изучения различных продуктов, заключающихся в бакинской нефти. Оказалось, что эта последняя, в различие от нефти большинства других местностей, а в особенности от рангоонской, канадской, пенсильванской и галицийской, не содержит парафина в тяжелых продуктах перегонки выше 300 градусов, а потому ни при каком охлаждении, никакая часть перегонок, бывших в моем распоряжении, не выделила кристаллов парафина. Эти тяжелые продукты перегонки нефти (в которых обыкновенно заключается парафин) вывезены мною из Баку и употреблены были для дифференциальных барометров. Они вновь были перегнаны сперва с термометром, а потом без него, когда температура в парах до-

стигла до 350°. Части бакинской нефти, кипящие выше 350°, были отобраны, вновь перегнаны, очищены при помощи серной кислоты и едкого натра и высушены новой перегонкой над металлическим натрием. Полученный продукт желтоватого цвета, имеет удельный вес 0,862 при 20°, ему свойствен общеизвестный запах нефти, хотя в слабой мере, и потому можно было думать, что этот продукт имеет заметную упругость пара. Для испытания полученного нефтяного масла в этом отношении был сделан следующий опыт: несколько сот грамм этого масла было помещено в стклянку, находящуюся в паровой водяной ванне, то есть при 100°. При этой температуре и при давлении не более 200 мм. в течение 8 часов был пропускаем чрез масло воздух, так что его пузырьки проходили со дна сосуда наверх. Отверстие, чрез которое входил воздух, было так сужено зажимом, что при постоянном действии водяного насоса, выкачивающего воздух из колбы, давление, под которым находилась нефть, а следовательно и то, при котором проходил воздух, было постоянно поддерживаемо около 200 мм., то-есть уменьшено противу атмосферного давления на 500—600 мм. В этих обстоятельствах должно было предполагать значительное испарение летучих частей нефтяного масла, если упругость паров его значительна. Предполагалось именно этим путем удалить остаток летучих веществ. Оказалось однако, что и после такой обработки нефтяное масло сохранило свой первоначальный запах, нисколько его не изменивши, и, что особенно важно, оно потеряло во все это время не более одного дециграмма из 400 грамм своего веса. Это указывает на то, что количество летучих продуктов, заключающихся во взятом образце нефтяного масла, так мало, что и при малых давлениях при 100° испаряемость его весьма незначительна. Главная масса взятого масла, судя по внешним признакам, перегоняется около 400°. Итак, по всему тому, что сделано со взятым нефтяным маслом, можно думать, что имеющийся продукт не представляет упругости паров, значительно превышающей ту, какая свойственна при той же температуре ртути. Введя каплю такого масла в барометр, я не заметил катетометром изменения в высоте барометра. Впоследствии такой же обработкой я желал приготовить нефтяное масло из американской нефти, но оно содержит параффин, имеет другой удельный вес и относительно его свойств я не могу в настоящее время высказаться еще столь определенно, как относительно масла бакинской нефти. Большая подвижность этого последнего и трудная летучесть при незначительном удельном весе составляют весьма важное достоинство этого вещества, примененного мною и для других целей. Сверх того оно отлично хорошо смачивает стекло и в этом отношении весьма драгоценно для устройства манометров. Опыт показал, что в трубках диаметром более 2-х миллиметров, при одинаковом диаметре, капиллярное давление такого масла одинаково. Ни для воды, ни для оливкового масла, ни для ртути этого нет, ибо первые плохо, а последняя вовсе не смачивает стекла. Относительно способности хорошо смачивать стекло нефтяное масло подобно многим другим углеводородам, амиловому спирту и т. п. летучим жидкостям, которые по своей летучести для манометров непригодны. Нелетучее нефтяное масло

дает возможность устраивать манометры диаметром даже в 2—3 мм., хотя для большей верности в дифференциальных барометрах, назначенных для наблюдения на одном месте, устраиваются мною манометры гораздо большей ширины, даже в 10 и 15 мм. Показания этих последних, сличенные с показаниями таких барометров, при которых манометрические трубки имеют диаметр в 2 мм., были одни и те же в целом ряде наблюдений, а потому ныне считаю совершенно безопасным устройство нефтяных манометров даже при диаметре в 2 мм., соблюдая только то условие, что обе трубки манометра были, по возможности, одного диаметра.[1] Употребляя нефтяное масло, не представляющее заметной упругости пара, можно быть уверенным в том, что из манометра в воздух резервуара при обыкновенной температуре не попадет с переменою температуры, в практике встречающейся, заметного количества паров, могущих изменить давление воздуха, заключенного в резервуаре.

Для того, чтобы показания дифференциального барометра были постоянными с переменою температуры воздуха, заключенного в резервуаре, необходимо, чтобы этот воздух был сух, ибо иначе влажность, в нем содержащаяся, может превратиться в жидкость и упругость заключенного воздуха изменится не пропорционально изменению температуры. По этой причине за краном, приводящим воздух в дифференциальный барометр, всегда необходимо помещать высушивающий прибор, а именно: трубку с хлористым кальцием. Нет необходимости в абсолютной сухости, а потому короткая трубка с хлористым кальцием совершенно достаточна для этой цели.

Главное преимущество, представляющееся при вышеописанном устройстве дифференциального барометра, состоит именно в том, что воздух, в нем находящийся, возобновляется время от времени и со-

---

[1] Выбор узких трубок равного диаметра быстрее всего производится при помощи наблюдений капиллярных поднятий. Подробности об этом способе будут помещены в следующей главе (6-ой) (об исследовании трубок), а теперь укажу только сущность приема. Для этого в сосуде с водою укрепляется та трубка, к диаметру которой желательно подобрать другую трубку, а рядом ставятся другие исследуемые трубки. Они погружаются более или менее в воду. Если катетометром наблюдают высоты воды в обеих трубках, то можно судить о равенстве диаметра по равенству высот. При меньшем диаметре поднятие будет выше и, наоборот, при бо́льшем диаметре будет ниже. При диаметре в 2 мм. легко, скоро и точно до $^1/_{10}$ мм., можно сделать выбор нескольких трубок. Необходимо при этом однако соблюсти то условие, чтобы трубки были весьма тщательно вычищены и чтобы смачивание их было совершенно, а для этого пред наблюдением необходимо всасывать в каждую трубку воздух, чтобы жидкость поднялась выше надлежащего уровня и затем опустилась по смоченной части трубки. При диаметрах, еще меньших, чем в 2 мм., такой выбор представляет точность, еще бо́льшую, и при помощи такого приема возможно быстрое и весьма удобное калибрование капиллярных трубок, назначаемых для термометров и т. п. приборов. В этом последнем случае следует брать не воду, худо смачивающую стенки стекла, но жидкости, более подвижные, например, амиловый спирт, отлично хорошо смачивающий стекло. Исследования (Химический журнал Соколова и Энгельгардта 1860 г.), сделанные мною в этом отношении, показывают, что поднятие амилового спирта в капиллярных трубках представляет весьма значительное постоянство. Впоследствие многие другие подтвердили это новыми наблюдениями.

храняется вообще непродолжительное время в приборе. Если происходит диффузия воздуха чрез нефтяное масло, то она, во всяком случае, чрезвычайно мала, как показывают наблюдения, сделанные мною с первым дифференциальным барометром. В ноябре 1872 г. был сделан мною для определения диффузии следующий опыт. При давлении, определенном ртутным барометром, кран дифференциального барометра был заперт; в этом состоянии он оставлен на 15 дней и тогда определено показание дифференциального и ртутного барометров. Введя все необходимые поправки (на температуру ртути, масла и воздуха) в обоих барометрах, оказалось, что нормальный барометр показал различие давлений, равное 5,78 мм., а нефтяной манометр показал 5,83 мм., переводя высоту наблюденного столба нефти на высоту ртутного столба. Следовательно, если и произошла диффузия, то в течение двух недель она оказала влияние только на сотые доли мм. давления по ртути, а потому в короткое время, от одного наблюдения до другого, погрешность этого рода должно считать неизмеримо малою. Другое важное преимущество описываемого прибора состоит в том, что в начале опыта, когда кран запирается, давление манометрическое нет нужды измерять, ибо уровень масла в обеих ветвях одинаков, следовательно, первоначальные данные всегда одни и те же и дальнейшие данные таким образом избавляются от погрешности наблюдения, свойственной первому отчету. Если бы и при нем необходимо было производить сличение высот в обеих ветвях манометра, то дальнейшее определение заключало бы двойную погрешность. Чрез это, кроме того, достигается простота в получении результата и, следовательно, быстрота наблюдения. Указанные качества моего дифференциального барометра отличают его от других предложенных форм приборов этого рода, в коих измерение барометрического давления производится на основании применения Мариоттова закона к определенной массе запертого воздуха. Сличения, далее приводимые, показывают ту степень точности, какой можно достичь с прибором, устроенным на вышеизложенных основаниях.

§ 53

Для того, чтобы по наблюдениям над дифференциальным барометром найти изменение в барометрическом давлении, рассмотрим общий случай: переменного объема и переменной температуры.

Назовем чрез B_0 барометрическое давление, измеренное миллиметрическою высотою ртутного столба при 0°, а именно, то давление, при котором кран прибора запирается и когда уровни масла в обеих ветвях манометра одинаковы. При изменении давления из B_0 в B_1 произойдет изменение в уровнях масла в манометре. Искомое $x = B_1 - B_0$ изменение этого давления, выраженное также в миллиметрах ртутного столба при 0°, найдется по величине разности высот масла в обеих ветвях манометра. Назовем эту разность высот масла чрез D и пусть она выражена в мм., а плотность масла при температуре, которую оно имеет, назовем чрез S. Величину D будем считать положительною тогда, когда в открытой ветви манометра, сообщенной с атмо-

сферою, масло стоит ниже, чем в закрытой ветви манометра,[1] сообщенной с воздушным резервуаром, кран которого заперт. По наблюдаемому D требуется найти x — изменение атмосферного давления. Определение этой величины основывается на допущении справедливости законов Мариотта и Гей-Люссака, при малом изменении давления и малой перемене температуры, что, в пределах возможных погрешностей наблюдения, во всяком случае справедливо. Назовем чрез T_0 температуру, которую показывал термометр прибора, заключающего воздух в момент закрытия крана, а чрез T_1 назовем температуру в то время, когда наблюдается разность уровней D. Обозначим чрез V_0 объем воздуха, заключающегося в приборе в момент закрытия крана при T_0. При температуре T_1 он будет $= V_0(1 + kt)$, если чрез k означим коэффициент расширения сосуда: $t = T_1 - T_0$. Означим далее чрез v — емкость цилиндра высотою в 1 мм., а сечением равного сечению манометрической трубки и пусть при наблюдении высоты D нефтяное масло в закрытой ветви манометра поднялось[2] на $+ n$ миллиметров[3] (считая n, как и D, за положительную величину, когда в закрытой ветви произойдет поднятие масла).

---

[1] Весьма важно обращать при употреблении дифференциального барометра должное внимание на знаки. В дальнейшем изложении D будет принято положительным при увеличении атмосферного давления, то есть тогда, когда x есть величина положительная и, следовательно, тогда, когда упругость воздуха в резервуаре при той же температуре и том же объеме, какие были в момент закрытия крана, будет меньше атмосферной упругости в момент наблюдения. По этой причине увеличение объема воздуха, запертого в резервуаре, уменьшающее упругость воздуха резервуара и выражающееся в понижении уровня масла в закрытой ветви манометра, должно быть выражено отрицательною величиною n, а потому при отчете D и при счете n должно считать, начиная с открытого конца манометра: если уровень нефти в *открытой* ветви манометра ниже, чем в закрытой, D положительное, а если уровень нефти в *закрытой* ветви выше, чем был в момент затвора крана, тогда n положительное. Чтобы при записи данных не произошло перемешивания, лучше всего означить счет миллиметров в манометре, начиная с открытого его конца. Пусть, например, высота манометра 200 мм. На открытой его ветви должно означить счет сверху от 0 до 200, а на закрытой — снизу от 200 до 400. Если в момент закрытия крана уровни масла были на 100 и 300 мм., а при наблюдении при 150 и 360, то $D = 150 + 360 - (100 + 300) = 110$ мм., что означает величину положительную, то есть возрастание атмосферного давления. Значение $n = 360 - 300$ при этом есть также положительное $= 60$. Такой род записи устраняет возможность перемешивания знаков и ветвей манометра (наружной и внутренней), а потому должен быть считаем наиболее практическим. При этом способе означения все коэффициенты k_0, k_1 и k_2 в формуле, далее (стр. 131[=417]) приводимой, суть положительные величины, а только величины D, n и t могут быть с + или —. Вычитая из суммы замеченных отчетов (в предшествующем примере из 510 = 150 + 360) сумму отчетов, стоящих на одной высоте (400 в предшествующем примере), получим величину D прямо с соответственным знаком (в предшествующем примере $510 - 400 = +110$); вычитая из наблюденного стояния нефти (360) в закрытой ветви отчет в момент закрытия крана (300), а из замеченной при наблюдении температуры ту, которая была при закрытии крана, получим со знаками величины n и t.

[2] Если давление увеличится ($B_1 > B_0$), то при постоянной температуре так и будет.

[3] Если манометр принят за совершенный цилиндр, то при постоянной температуре и постоянном количестве масла, $n = \frac{D}{2}$, ибо масло в одной ветви поднимется, в другой опустится.

В момент наблюдения объем воздуха в резервуаре будет или более (когда n — величина отрицательная) или менее (когда n — положительная величина, масло поднялось) первоначального V_0, смотря по двум обстоятельствам: во 1) по тому положению, которое занимает масло в той части манометра, которая сообщена с резервуаром, а во 2) и по температуре прибора, а именно, этот объем будет $V_0(1 + kt) = nv$. Давление (в миллиметрах ртутного столба при 0°), под которым находится воздух, заключенный в резервуаре, в момент закрытия крана $= B_0$, а в момент наблюдения высоты D оно будет =

$$B_1 - D\frac{S}{Hg} + D\frac{e}{Hg},$$

где Hg есть плотность ртути при 0° = 13,596, а e вес (плотность) воздуха в опыте; член $D\frac{e}{Hg}$ необходимо ввести здесь, потому что при понижении уровня масла в открытой ветви манометра на масло станет действовать столб воздуха бо́льшей высоты, чем первоначально.

Так как масса воздуха, запертого в сосуд, остается тою же самою, то очевидно, что будет существовать, по совокупности законов Мариотта и Гей-Люссака, равенство:

$$\frac{V_0}{1+\alpha T_0} B_0 = \frac{V_0(1+kt) - nv}{1+\alpha T_1}\left(B_1 - \frac{S-e}{Hg} D\right),$$

где α есть коэффициент расширения воздуха (= 0,00367).

Так как $B_1 = B_0 + x$, то из предшествующего уравнения определяем x, означив чрез t разность $T_1 - T_0$, а чрез w отношение $\frac{v}{V_0}$:

$$x = \frac{S-e}{Hg} D + B_0 \frac{(\alpha - k)t + nw(1+\alpha T_0) - k\alpha t T_0}{(1+\alpha T_0)(1+kt-nw)} \qquad (A)$$

Величины S, Hg, α, k и w известны заранее, величины T_0 и B_0 определяют при закрытии крана, величины T_1, $t\,(= T_1 - T_0)$, n, D и e — при наблюдении. Кажущаяся сложность этого определения и расчета значительно упростится, если ближе рассмотреть влияние различных величин на результат, то есть на определение x. Прежде всего заметим, что значение x слагается из двух членов: первый член $D\frac{S-e}{Hg}$ не содержит ни температурных, ни объемных, ни барометрических данных, а только две переменных величины: $S - e$ и D. Изменение в значении $S - e$, а особенно изменение в e относительно невелики и e можно принять в обычных условиях за постоянную величину 0,0012, значение же S, то есть плотность нефтяного масла, определяется предварительным опытом. Устройство прибора и ход определения должны быть таковы, чтобы этот первый член выражал наибольшую часть того изменения x в давлении, которое произошло от времени закрытия крана до времени наблюдения. Для того, чтобы второй член был близок к 0, должно величины t, w, n сделать возможно малыми, и это всегда возможно. Действительно, если температура воздуха в сосуде остается тою же, величина $t = 0$; если сосуд (V) велик, а масляный манометр узок, то w

(равное $\frac{v}{V}$) будет мало; если же объем газа при наблюдении привести к той же величине, какую он имел при закрытии крана, то $n = 0$. Следовательно, весь второй член можно сделать $= 0$, а потому можно, в действительности, по произволу близко приближаться к нему. Тогда результат наблюдения будет, главным образом, определяться наблюдением D, и влияние первоначального члена B_0 на результат наблюдения (x) будет мало. Ввиду малости 2-го члена предшествующего равенства (A), его можно упростить, пренебрегая величинами высших порядков. Притом, так как допускаемое температурное изменение не велико, а коэффициент расширения сосуда (k) мал. то, в пределах погрешностей опыта, его влиянием можно пренебречь, означая чрез V объем сосуда при температуре наблюдения. После этих допущений предшествующее выражение упрощается, оставаясь точным, в пределах возможных погрешностей, для всех x, если только n и t малы. Тогда

$$x = \frac{S-e}{Hg} D + B_0 \frac{a-k}{1+aT_0} t + B_0 w n. \qquad (B)$$

Величины D, t и n даются наблюдением, величина $\frac{S-e}{Hg}$ чувствительно изменяется только с переменою температуры масла, а при знании ее есть величина, заранее известная, определенный постоянный коэффициент, который мы далее означим чрез k_0. Такими же постоянными коэффициентами можно считать величины $B_0 \frac{a-k}{1+aT_0}$ и $B_0 w$, хотя B_0 и T_0 суть величины, переменные от одного опыта до другого. Но изменение в B_0, в обычных условиях опытов, не превышает $^1/_{20}$ от среднего давления в месте наблюдения, а если величины n и t абсолютно малы, то все значение второго и третьего члена (B) мало, а потому подставив *для того случая*, когда B_0 и T_0 неизвестны, вместо B_0 и T_0 средние их значения, мы сделаем тогда только очень малое отступление от истины. Считая же B_0 и T_0 постоянными, мы значит будем иметь при t и n постоянные коэффициенты, которые означим чрез k_1 и k_2. Тогда предшествующее выражение получает вид:

$$\ldots\ldots x = k_0 D + k_1 t + k_2 n \qquad (C)$$

Коэффициент k_0 меняется с природою и температурою масла и должен быть точно заранее определен, k_1 изменяется с условиями опыта, с средним давлением и температурою на месте наблюдения, а k_2—с устройством прибора, ибо в него входит $w = \frac{v}{V}$. Мы займемся теперь определением $k_1 t$ и $k_2 n$, а потом первым, главнейшим членом $k_0 D$.

§ 54

В большинстве тех применений, для которых назначается дифференциальный барометр, изменение температур t должно быть незначительно, потому что наблюдения будут следовать быстро одно за другим. Так, например, в применении дифференциального барометра к нивел-

лированию, его должно перенести с одного места на близкое другое, а в течение краткого промежутка времени температура изменится сравнительно весьма мало. Притом есть всегда возможность довести температуру воздуха в резервуаре дифференциального барометра до первоначальной, то есть сделать T_1 равным T_0 и $t = 0$. Для этой последней цели в некоторых дифференциальных барометрах устроено мною приспособление для легкого изменения температур до желаемой степени. Это достигается при помощи металлической трубки, проходящей чрез ванну, содержащую воздушный резервуар. Вливая в эту трубку более холодную или более теплую воду, легко и точно можно при перемешивании воды в ванне довести температуру до первоначальной T_0, или, по крайней мере, приблизить к ней весьма значительно. В тех дифференциальных барометрах, которые назначаются для постоянных наблюдений на одном месте, всегда возможно достичь постоянства температуры многими приемами. Проще всего достигается это помещением сосуда с воздухом в резервуаре с большим количеством воды, а во многих случаях может быть это достигнуто еще вернее, зарывая резервуар дифференциального барометра на некоторую глубину в землю, где имеется постоянная температура. При этом упрощается весь ход наблюдений, так как за термометром нет нужды следить, ибо температура остается постоянною.

Если температурную поправку $k_1 t$ необходимо допустить при определениях x, то ее всегда можно сделать весьма точно даже без помощи точного и особого выверенного термометра, так как дифференциальный барометр сам по себе представляет воздушный термометр, дающий всегда возможность проверить показания чувствительного термометра, помещенного в ванне резервуара. Это можно сделать разными способами, а проще всего следующим образом: возьмем два дифференциальных барометра, термометры которых предварительно между собою сличены,[1] и оставим их некоторое время при однообразной температуре. Тогда запрем единовременно краны обоих барометров и один из барометров затем охладим или нагреем каким-либо средством на $t°$, где t означает разность температур обоих термометров. Тогда в нагретом или охлажденном барометре уровни нефти в манометре изменятся на D_1. Если в течение времени нагревания произойдет изменение барометрического давления, то оно окажется при помощи другого дифференциального барометра, так что показания нагретого или охлажденного барометра можно будет исправить при помощи того, которого температура осталась неизменною. Пусть показание второго барометра тогда будет D_2. Сличив t—разность показаний термометров при обоих барометрах— и разницу показаний манометров $(D_1 - D_2)$, при них находящихся, мы получим, сколько мм. масла $(D_1 - D_2)$ отвечают изменению температуры на $t°$ по показаниям обоих термометров и при том начальном давлении B_0, при котором заперты краны, а потому узнаем, сколько приходится на 1° мм. масла. Разделив найденное число на Hg и умно-

[1] Для этой последней цели весьма полезно в ванне дифференциального барометра иметь два отверстия для вставления двух термометров.

жив на $(S—e)$, получим k_1, то-есть сколько мм. ртутного столба приходится при B_0 на 1° тех термометров, которые находятся при взятых дифференциальных барометрах. Таким образом непосредственно наблюдаемые разницы указаний в манометре могут быть чрез вышеописанное определение исправлены на изменение температур, наблюдаемых термометром, с точностью, даже и тогда, когда термометры представляют значительные погрешности в делениях. Эти определения с особенною легкостью и точностью могут быть делаемы при тех дифференциальных барометрах, которые снабжены средствами для скорого и легкого повышения и понижения температуры. При употреблении таких барометров есть возможность получить вспомогательную таблицу значений k_1 или отношений между манометрическим показанием и показаниями термометров, смотря по величине первоначальных T_0 и B_0. Если желательно в некотором отдельном наблюдении, где t было значительно, точно узнать k_1, то можно *для тех самых условий, при коих произведено определение* x, *найти тотчас вслед за тем выше описанным способом* k_1. На этом предмете, однако, я долее не остановлюсь по той причине, что в большинстве случаев дифференциальный барометр может быть предохранен от изменения температуры или эти изменения можно признать, как будет указано далее, пропорциональными времени.

Для обыкновенных случаев, когда t мало, а наблюдения производятся в жилом помещении, где T изменяется от 15° до 20°, а B от 72 до 78 сант., значение k_1 можно принять равным 2,6, ибо $k_1 = \frac{Ba}{1+aT_0}$ тогда изменяется от $k_1 = 2{,}46$ до $k_1 = 2{,}71$. Если $t = 0{,}05$, то, приняв $k_1 =$ средней величине 2,6, мы сделаем в x погрешность не более 0,007 мм., а сохранить температуру ванны с точностью до 0,05° очень легко. Поэтому в обычных определениях k_1 можно признать постоянною.

Последний член выражения для x есть $k_2 n$. Он зависит от отношения w между емкостью v одного деления манометрической трубки и емкостью V всего воздушного резервуара в приборе. Чем меньше это отношение, тем этот член будет меньше. В тех дифференциальных барометрах, где количество нефти постоянно, этот член непременно будет иметь значение, потому что положение нефти в закрытой ветви манометра будет при изменении давления переменяться и потому-то в дифференциальных барометрах этого рода необходимо иметь сравнительно узкие манометрические трубки и большие резервуары для того, чтобы отношение $\frac{v}{V}$ было по возможности мало. В тех же дифференциальных барометрах, где есть возможность изменять количество нефти, находящейся в манометре, всегда возможно привести стояние нефти в закрытой ветви манометра к одному, заранее определенному месту, а именно, к тому самому, на котором стояла нефть в этой ветви манометра при закрытии крана. В этим последнем случае весь член $k_2 n$ уничтожается или, по крайней мере, может быть сделан чрезвычайно малым, потому что в этом роде барометров, хотя бы w, а следовательно и k_2, были ве-

лики, все же член $k_2 n$ будет очень мал. Следовательно, или n, или k_2 можно сделать малыми. Так как устройство нефтяных манометров с переменным количеством нефти затруднительнее, чем манометров с постоянным количеством нефти, и так как при точнейших определениях должно ввести поправку и на небольшие изменения уровня нефти, то мы опишем вслед за сим способ, допускающий определение k_2 в готовом уже приборе. Так как $k_2 = B_0 w$ или $B_0 \frac{v}{V}$, то зная из предварительных определений емкость всего прибора V и емкость одного миллиметра манометра v, легко найти k_2, но этот способ не пригоден к определению k_2 в готовом приборе, а потому для практики полезно сделать определение независимым от сборки прибора, то есть сделать его, не разбирая прибора. И этого легко достичь.

Определение w должно соединить с определением плотности нефтяного масла S, заключающегося в манометрической трубке. Так как нефтяное масло не представляет некоторого определенного химического соединения, а есть смесь, то плотность его при некоторой постоянной температуре меняется. Она меняется также и с переменою температуры, но коэффициент расширения нефтяного масла, как показал мне опыт, весьма мало меняется для разных сортов нефтяного масла, кипящих выше 300°. Плотность же разных сортов этого масла при некоторой определенной температуре меняется довольно значительно, и потому величина ее, определяющая значение коэффициента k_0, должна быть определена для данного сорта и, лучше всего, если это будет сделано при помощи самого дифференциального барометра. Этого можно достичь, определяя отношение между высотами нефтяного масла и воды при разрежении воздуха в одной из ветвей манометров водяного и масляного. Для этого я поступаю следующим образом: рядом с нефтяным манометром исследуемого прибора помещается особый, временный широкий водяной манометр. Одна ветвь этого последнего соединяется герметически, при помощи мастики, с открытою ветвью нефтяного манометра, находящегося при дифференциальном барометре, и в то же время соединяется с каучуковою трубкою, снабженною зажимом. Кран дифференциального барометра в этом случае должен быть открыт. Вытянув из соединенных ветвей водяного и нефтяного манометров часть воздуха, так чтобы в этих ветвях нефть и вода поднялись на довольно значительную высоту, запрем зажимом каучуковую трубку, служащую для высасывания воздуха, и дадим равняться температуре нефти и воды. Тогда наблюдаем при помощи общей шкалы, например катетометров, высоты воды и нефти в обоих сообщенных манометрах. Отношение этих высот покажет плотность нефтяного масла, находящегося в манометре, по отношению к воде при температуре наблюдения, то-есть этим способом определится для данного дифференциального барометра величина S, входящая в первый член выражения для x. При этом должно не забыть ввести поправку на плотность воздуха. Пусть, например, верхние уровни масла и воды находятся на одной высоте и пусть высота столба нефти = 400,00 мм., а воды = 346,06 мм. Так как нижний уровень нефти при этом будет ниже нижнего уровня

воды на 53,94 мм., то на него будет действовать бо́льшее давление воздуха, а потому если бы давление на воду было такое же, как на нефть, то высота водяного столба была бы не 346,06 милл., а 346,06 + 0,0012 · 53,94 = 346,12. Поэтому вместо непосредственно наблюдаемой плотности $\frac{346,06}{400,00} = 0,86515$ будем иметь истинное отношение плотностей $\frac{346,12}{400,00} = 0,86530$. Зная это отношение при некоторой температуре и умножив его на плотность воды при этой температуре (стр.61[=318]), получим плотность нефтяного масла при t_1 по отношению к воде при той же температуре ее наибольшей плотности, то есть истинную плотность нефтяного масла при t_1. Прямые опыты показали мне, что для тяжелых (трудно летучих) сортов бакинской нефти можно принять при обыкновенных температурах (от 0 до 30°) изменение объема на 1° равным 0,000807 и постоянным, то-есть

$$V_t = 1 + 0,000807\ t$$

Поэтому, узнав плотность нефти при t_1 и умножая ее на $1+0,000807t_1$, получим плотность при 0° по отношению к воде при 4°.

Пусть при некотором наблюдении с помощью дифференциального барометра замечена будет температура нефти t_2, а найденная прежде того плотность при $0° = S_0$, тогда очевидно $S = \frac{S_0}{1+0,000807t}$, а потому первый и важнейший коэффициент выражения для x, то-есть величина,

$$k_0 = \frac{S_0 - 0,0012}{(1+0,000807t_2)\,13,5959}$$

или приближенно

$$k_0 = \frac{S_0}{13,5959} - 0,00009 - 0,000052\,t_2.$$

В большинстве моих опытов употреблялось до сих пор масло, для которого

$$S_0 = 0,87420,$$

а потому для него с достаточною степенью точности можно принять:

$$k_0 = 0,06421 - 0,0000518\,t_2 = \frac{1}{15,574 + 0,0126t_2}.$$

Когда вышеуказанным способом определена кажущаяся плотность нефтяного масла, открыв зажим, дадим опять уравняться уровням нефти и воды в манометрах и тогда закроем кран дифференциального барометра и повторим наш опыт при закрытом кране в том же виде, как выше было описано, то-есть определим опять отношение высот нефти и воды в обоих манометрах. Теперь это отношение однако будет другое, чем было получено первоначально, и это будет зависеть от того, что в первом опыте на другую ветвь водяного манометра действовало такое же давление, как и на другую ветвь нефтяного манометра; в этом же

опыте на водяной манометр действует барометрическое давление, а на нефтяной — давление, меньшее, чем барометрическое, потому что при понижении нефти в закрытой части манометра происходит разрежение запертого в резервуаре воздуха и, следовательно, упругость его уменьшается. Очевидно, что, наблюдая при открытом и закрытом кране отношение высот масла и воды при одной и той же температуре обоих, мы найдем отношение емкостей $\frac{v}{V}$, потому что при закрытом кране давление, действующее на запертый воздух, равно $B - D_0 d_0 + D_1 S_1$, где D_0 и D_1 есть наблюдаемые тогда высоты воды и масла, плотности которых суть d_0 и S_1, и где B есть атмосферное давление,[1] действующее на открытый конец водяного манометра. Это давление уравновешивается упругостью запертого воздуха. При B был заперт объем воздуха $= V$, а теперь при наблюдении объем воздуха станет $V + nv$, где n есть число миллиметров манометра, на которое прибыл объем воздуха, то есть разность высот нефти при закрытии крана и при наблюдении в закрытой ветви манометра. Так как количество запертого воздуха осталось то же, то по закону Мариотта:

$$VB = (V + nv)(B - D_0 d_0 + D_1 S_1).$$

Отсюда, пренебрегая величинами высших порядков (ибо B очень велико пред nw) и полагая, как прежде, $w = \frac{n}{V}$, получим:

$$k_2 = Bw = \frac{D_0 d_0 - D_1 S_1}{n}.$$

Величина S_1 известна уже по предшествующим опытам, а все прочие величины по прямому наблюдению, а потому этим путем определится k_2.

Таким образом непосредственно на самом приборе определяются все важнейшие данные для дифференциального барометра. По формуле (В стр. 130[=411]) очевидно, что значение коэффициентов k_1 и k_2 изменится с изменением первоначального барометрического давления B_0, но в большинстве случаев первоначальное давление B_0 будет известно; а там, где оно даже вовсе неизвестно, хотя и приблизительно его можно принять близким к нормальному давлению, при данных условиях местности и времени, потому что с изменением барометрического давления значение x по данным дифференциального барометра изменится весьма незначительно. Однако, если принять B_0 за постоянную величину, мы не будем уже иметь той точности, какую получим тогда, когда в каждом определении будет известно B_0; а потому при значительных n и t надо знать B_0 и изменить k_1 и k_2 соответственно ему или *сделать особые определения* k_1 и k_2 *при существующих условиях опыта*, но в большинстве применений, когда t и n малы, с достаточною точностью можно

[1] Для точности определения необходимо иметь другой дифференциальный барометр, чтобы следить при его помощи за изменением барометрического давления и ввести поправку.

для каждого дифференциального барометра принять k_1 и k_2 за постоянные величины.

Таким образом для каждого дифференциального барометра придется найти три постоянных величины k_0, k_1 и k_2, но в барометрах с постоянною температурою и с постоянным объемом второй и третий члены будут или равными, или близкими к 0, а потому придется знать только одну постоянную k_0, точность определения которой может быть всегда сделана весьма значительной, ибо величина эта зависит только от плотности нефтяного масла. Надо заметить однако, что в определении величины S, если она производится обыкновенными способами нахождения удельных весов, должно ввести точную поправку на взвешивание в воздухе, ибо S предполагается уже исправленным в этом отношении. Если же при определении веса S не сделать этой поправки, то из найденного удельного веса и не должно вычитать e (см. форм.[1] и B). Здесь дело в том, что изменение давления x будет определяться не истинною плотностью нефтяного масла, а разностью плотностей нефтяного масла и воздуха, то есть из величины S истинной плотности по отношению к воде, при наибольшей ее плотности, должно вычесть плотность воздуха, которую можно принять за постоянную 0,0012.

Итак пусть при некотором давлении B кран дифференциального барометра будет заперт и пусть тогда температура будет T. Если мы затем заметим, при перемене места или времени: 1) приращение температуры t, 2) уменьшение в манометре объема запертого воздуха на n мм. и 3) разность высот D масла в нефтяном манометре, то в момент этих наблюдений давление будет:

$$B + k_0 D + k_1 t + k_2 n,$$

$$k_0 = \frac{S - e}{Hg} = \frac{S_0}{13{,}596} - 0{,}00009 - 0{,}000052\, t_2,$$

где t_2 есть температура нефтяного масла.

$$k_1 = B\,\frac{\alpha - k}{1 + \alpha T},$$

где $\alpha = 0{,}00367$ и $k = 0{,}00003$ для стекла, или 0,00005 для медного сосуда; k_1 близко к 2,6

$$k_2 = Bw,$$

где w есть отношение $\frac{v}{V}$ объема 1 деления манометра к объему всего сосуда, содержащего воздух.

§ 55

Дифференциальные барометры могут быть по применению своему разделены на два главных класса: на постоянные и переносные. Первые могут быть значительных объемов и в них легко достичь постоянства температуры; вторые должны быть легки и удобопереносимы, а потому в них желательно иметь средства для изменения температур. Первые

[1] [Повидимому, пропущено «*A*». *Прим. ред.*].

образцы дифференциальных барометров, которые были выполнены мною, принадлежали к первому разряду приборов. Устройство одного из них изображено на рис. III—I. Взят был стеклянный шар A емкости около 20 литров; в длинную шейку его при помощи пробки вставлен термометр T и две тонкие, как проволоки, медных трубки a и b. Трубка a сообщается с нефтяным манометром $cdfm$, содержащим постоянное количество нефти. Трубка b снабжена краном R и затем идет к сушильному прибору G, содержащему последовательный ряд стеклянных трубок, наполненных хлористым кальцием. Все эти трубки герметически между собою соединены при помощи пробок и мастичной заливки. Такой герметический запор особенно необходим при укреплении термометра и трубок a, b в шейке шара. Для этой цели под пробкою L и над нею расплавляется мастика после предварительного разгорячения заливаемых частей. Тогда запор в действительности герметичен, в чем однако необходимо убедиться особенными опытами. Для этой цели открытую часть манометра m должно сообщить при помощи мастики с нисходящею трубкою, погруженною во ртуть, и из сушила и шара вытягивать воздух, так чтобы ртуть поднялась до значительной высоты и тогда, заперев кран R, надо наблюдать, опускается или остается на месте в течение долгого времени ртуть. Если ртуть падает, то необходимо отыскать те места прибора, которые залиты не герметически, и их вновь залить или заплавить мастикою, пока весь прибор не будет держать совершенно плотно. Это же условие необходимо наблюдать с полною последовательностью при прибавлении каждой новой части в этих и других родах дифференциального барометра при их устройстве. Помимо соблюдения этого условия, конечно показание дифференциального барометра нельзя считать сколько-либо точным, а при помощи мастики всегда возможно достичь полного герметического соединения всех частей приборов подобного рода. Шар A окружен деревянным ящиком B, наполненным пухом и окруженным снаружи для равномерности лучеиспускания лучами фольги. Ящик B затем помещен в другой ящик D; пространство C оставлено пустым, а пространство между ящиками F и D залито мастикою E. Весь ящик сверх того ставится в такое помещение, которое удалено от окон, сквозного ветра, печей и тому подобных источников перемены температуры. При соблюдении этого условия постоянство температуры, достигаемое этими дифференциальными барометрами, было весьма удовлетворительно для точных наблюдений, потому что обыкновенно в течение одного или двух часов температура такого рода приборов не менялась более, как на несколько сотых долей градуса. Наружный край манометра m служит в этом приборе для того, чтобы было возможным оставить этот прибор на долгое время с запертым краном R. Если бы не было этого крана m, то нефть при уменьшении наружного давления и при возвышении температуры могла бы вылиться из манометра, а при обратных явлениях могли бы втянуться в шар, ибо высота манометра была около 500 мм., что отвечает столбу ртути = = 32 мм., перемена же давлений могла быть больше этого.

На рис. VIII — 7 изображен более совершенный прибор этого рода. Он состоит из деревянной кадки A, в которой помещается металли-

ческая водяная ванна, окруженная со всех сторон худыми проводниками тепла. В этой ванне помещается стеклянный шар, емкостью в 3 литра, с длинным горлом, в которое замастичено две тонких и гибких металлических трубки. Обе они снабжены кранами *E* и *C*, видными на рис. VIII — 8. Сверх того в ванне находится мешалка с пустотою внутри, дающая возможность, как будет описано впоследствии, легко переменять температуру ванны и доводить ее до определенной. Чрез трубки *BB*, ведущие в пустоту мешалки, можно для этой цели вливать теплую или холодную воду. Они же служат и для движения мешалки в воде ванны. Она сама удерживает в обычных условиях температуру с постоянством 0°,02—0°,05 в течение 1—2-х часов. Сверх того в воду ванны погружен (загнутый) термометр *T*, показывающий температуру воздуха (рис. VIII—8). Трубка, снабженная краном *C*, оканчивается сушилом *D* и кран *C* есть тот, который вполне необходим в каждом дифференциальном барометре по самому существу его устройства. Другая трубка *F*, идущая от сосуда к нефтяному манометру *XY*, расположенному сбоку кадки, также снабжена краном *E* для той цели, чтобы можно было с безопасностью оставить дифференциальный барометр на некоторое время. Если нет этого запасного крана, то, оставив дифференциальный барометр на продолжительное время, можно ждать при охлаждении воды в ванне и при увеличении атмосферного давления такого поднятия нефти в закрытой части манометра, что часть ее взойдет в трубку, и шар, а тогда прибор будет испорчен. При закрытом кране *E* этого не случится и потому при производстве наблюдения кран *E* должен быть открыт, и тогда, смотря по тому, поднимается или опускается от открытия этого крана нефть в закрытой ветви манометра, надо будет прибавлять или убавлять ее количество в манометре. Этот манометр снабжен весьма удобным в практике приспособлением для изменения количества нефти, находящейся в манометре. Для этой цели под манометром *GXYH* устроено расширение *I*, которое сужается внизу и кончается каучуковой трубкою с зажимом *K*. Кроме того к этому расширению приделана боковая трубка, которая при помощи каучуковой трубки и зажима сообщается с резервуаром для ртути *M*. Зажим *K* дает возможность выливать ртуть, находящуюся в приборе, а зажим *L* позволяет увеличивать ее количество. Часть расширения *I* наполняется ртутью, верхняя же часть и манометр — нефтяным маслом. Если желательно изменить уровень нефти в закрытой ветви манометра, то, приливая и отливая ртуть при помощи зажимов *KL*, мы достигаем этого не только с легкостью, но и с весьма большою точностью. Такое приспособление пригодно и во многих других случаях и употреблено мною в разных приборах. Сущность дела здесь в том что ни каучуковые трубки с зажимами, ни обыкновенные краны не могут служить для приливания самой нефти, ибо она разъедает каучук и растворяет сало, смазывающее краны; со ртутью же можно обходиться с большим удобством, и при ее помощи, не изменяя количества нефти, по произволу менять ее уровень. Это видоизменение дифференциального барометра, снабженное весьма широким манометром (около 17 мм. диаметром), дает весьма точные показания, как видно из

многих сделанных сличений. Здесь прилагается результат одного из таких сличений, случайно взятых из имеющихся под руками. Наблюдение разностей уровней в нефтяном манометре производилось здесь катетометром.

28 Октября в 11 часов и 52 минуты исправленная высота ртутного барометра была равна 749,19 мм., в 12 ч. она была = 749,22; нефтяной барометр был заперт в 11 часов 55 минут. Следовательно, тогда $B_0 =$ =749,20. При этом отчет на термометре показал $T_0 = 17°,221$, а уровень масла в закрытой ветви манометра отвечал показанию на катетометре = = 524,10 мм. В течение двух следующих дней, а также 31 октября я пользовался не раз показаниями дифференциального барометра, а 31 октября было сделано новое определение. В 11 часов 25 минут исправленное состояние барометра B_1 было = 741,59, следовательно, непосредственное определение $x = -7,61$ мм. В то же время, после возможно точного приведения температуры ванны к начальной и после прилития ртути до того, чтобы уровень закрытой части нефтяного манометра был близок к прежнему, оказалось $T = 17,280$, D (разность высот нефти в закрытой и открытой ветвях) $= -122,30$ мм.,[1] температура нефти $t_2 = 17,88$, положение уровня в закрытой ветви 523,97. Предварительные определения для этого дифференциального барометра показали, что для него $k_0 = 0,06482 - 0,000052\,t_2$, а так как $t_2 = 17,88$, то $k_0 = 0,06389 = \frac{1}{15,65}$. Судя по тому, что $H_0 = 749,20$ и $T_0 = 17,221$, находим $k_1 = 2,585$; отдельные опыты показали, что для этого прибора $w = \frac{v}{V} = 0,000088$, а потому $k_2 = 0,0659$. Так как, судя по наблюдениям, сделанным над дифференциальным барометром $D = -122,30$, $t = 17,280 - 17,221 = 0,059$ и $n = 523,97 - 524,10 =$ $= -0,13$, то по ним $x = -0,06389 \cdot 122,30 + 0,059 \cdot 2,585 - 0,13 \cdot$ $\cdot 0,0659 = -7,653$, а потому ртутный барометр показал убыль давления 7,61, а дифференциальный 7,65 мм ртути. Разность должна быть приписана преимущественно погрешности ртутного барометра, которая нередко достигает в отдельных определениях 0,03 мм.

§ 56

Для мест постоянного наблюдения, например, для метеорологических станций, также как и для домашнего употребления, дабы знать возрастание и уменьшение барометрического давления и, в особенности, чтобы определять эти величины быстро, с значительною точностью, весьма полезно, как было упомянуто выше, резервуар дифференциального барометра помещать на некоторую глубину в землю. На глубине

[1] Знак (—) показывает, что в наружной ветви манометра нефть стояла выше, чем во внутренней; это, как указано было на стр. 129[=409] определяется тем, что счет ведется сверху вниз, начиная от наружной ветви манометра. В этом наблюдении пришлось бо́льшую высоту вычитать из меньшей, а потому и получается: — Руководствуясь всегда вышеприведенными (стр. 129[=409] примечание) замечаниями, нельзя делать ошибку в знаках.

от одной до полуторых сажень температура, не только в течение нескольких часов, но даже и целых дней, в наших климатах остается почти неизменною. В течение такого промежутка времени, как дня в 2 или 3, ее можно считать вполне постоянною и, следовательно, нет нужды наблюдать термометр, что облегчает способ определения давления и самое устройство прибора. Стеклянный шар, помещаемый таким образом в землю, должен быть по возможности велик, чтобы можно было, ради простоты устройства, иметь манометр с постоянным количеством нефти. Для этой цели может служить большая стеклянная бутыль, так, например, в приборе, помещенном в моей лаборатории и изображенном на рис. X—1, взят баллон из под серной кислоты *A*, емкостью около 56 литров. Горло сосуда должно кончаться герметически залитой стеклянной или металлической трубкой. Проще всего для этой цели брать тонкие стеклянные трубки, которые очень хорошо вмастичиваются при помощи пробки и заливки мастикой. Для безопасности при установке лучше однако взять тонкую свинцовую трубку (*ab*). Доведя трубку до места прикрепления манометра, необходимо при начале его поставить *T*-образную трубку, снабженную краном *r* и за ним сушилом, чтобы при открытии этого крана сухой воздух входил в шар, и давление в шаре уравнивалось бы с тем, которое имеет воздух в момент запирания крана. Прибор этого рода так просто устраивается и показания его так явственны, что желательно видеть его распространение в практике. По этой причине на таблице *X* и приложен эскиз такого рода прибора, который устроен мною в последнее время. К сожалению, наблюдения с ним я еще не имел времени сделать и потому не могу привести чисел для сличения его показаний с данными нормального барометра в течение некоторого времени. Нефтяной манометр при такого рода дифференциальных барометрах должен иметь значительные размеры, и, если шар, зарытый в землю, представляет объем бо́льший, то проще и короче всего устроить манометр с постоянным количеством нефти. На рисунке и представлен манометр этого рода.[1] Отчет точнее воспроизводится, если шкала начерчена на зеркале, ибо тогда легко избегается параллактическая погрешность. Высота нефтяного манометра в приборах этого рода должна быть сделана не менее метра, если желают на долгое время сохранить запертый кран, потому что барометрическое давление в течение нескольких дней нередко изменяется на 40—50 мм. ртутного столба, что отвечает 600—750 мм. нефтяного столба. Устроенный у меня манометр имеет длину в метр, чтобы иметь возможность на долгое время пользоваться показаниями нефтяного манометра, не открывая сообщения с воздухом. Так как при небольшом изменении барометра поднятия нефтяного масла в открытой ветви манометра весьма значительны, то легко устроить при такого рода неподвижных дифференциальных барометрах записывающий (регистрирующий) прибор. В особенности же считаю я полезным применение дифференциального барометра для тех случаев, когда

[1] На рис. виден, кроме большого резервуара *A*, меньший воздушный резервуар *B*, емкостью около 20 литров. Он назначен для целей, упомянутых на стр. 109[=383].

необходимо следить за малыми изменениями барометрического давления, столь трудно наблюдаемыми на ртутных барометрах, или тогда, когда необходимо видеть ясно скорые изменения в барометрическом давлении. Такой случай представляется, например, при шторме и вообще при ненормальных уклонениях погоды, всегда связанных с направлением и силою ветров и с изменением давлений. Перемены в этих отношениях обыкновенно совпадают, так что, следя за чувствительным барометром, можно видеть и ждать изменений в силе или направлении ветра. Приведу в этом отношении личный пример. В ночь со 2-го на 3 ноября 1873 года при сильном западном ветре вода Невы так поднялась, что грозила затоплением нижнего этажа университета, где расположена моя лаборатория. Находясь в ней в это время, я постоянно следил за изменением дифференциального барометра и в то же время мне чрез каждые пять минут давали знать о прибыли воды. Часов около 2-х ночи замечено было первое поднятие давления, оно было едва приметно даже на дифференциальном барометре. Вслед за тем оказалось, что вода перестала прибывать; еще чрез 5 минут, когда сделалось заметное возвышение давления, оказалось, что ветер стих и вода уже заметно убыла. С этого времени барометр пошел вверх, а вода стала падать. Таким образом по дифференциальному барометру явление изменения силы и направления ветра оказалось ощутительным еще тогда, когда внешние признаки не давали возможности их предвидеть. Такого рода применение дифференциального барометра кажется мне особенно важным для кораблей. В трюме корабля, где температура довольно равномерна, можно расположить сосуд с воздухом, а на палубе или в каюте манометр с узкою трубкою, ибо в ней колебания уровней при качке будут незначительны.[1] В определенный час дня, когда производится барометрическое наблюдение, кран дифференциального барометра должно открыть и, когда уровни масла в обеих ветвях уравняются, вновь закрыть. Тогда всякие, а особенно быстрые и значительные изменения давлений будут очевидны до такой наглядности, что их не пропустит самый неопытный наблюдатель,[2] а такие барометрические изменения и суть, как известно, единственные точные предвестники шквалов, смерча и других видов бури, нередко настающих весьма быстро. Надо не забыть при этом, что падение давления пред бурями иногда достигает 20—30 миллиметров. Эта сравнительно незначительная величина на дифференциальном барометре с нефтяным маслом выражается разностью уровней в 300—400 миллиметров, то есть таким столбом, который можно легко видеть издали. Подобное же применение дифференциального барометра считают не бесполезным и для сельских хозяев, у которых вопрос о состоянии и изменении погоды иногда играет весьма важную роль, а ее изменения сопряжены чаще всего с падением или возвышением барометра, а не с абсолютною величиною давления. Устройство постоянного барометра, зарытого

[1] Для этой цели полезно заменять нефтяное масло более густым оливковым или даже глицерином.

[2] Можно устроить, чтобы при поднятии или падении больше известной величины получался сверх того сигнал.

на некоторую глубину в землю, столь просто, что доступно каждому, а способ наблюдения за падением или возвышением давления здесь не усложнен отчетом термометра, а потому совершенно нагляден.

Что касается до способа расчета показаний постоянного дифференциального барометра, то они упрощаются до нельзя, если взяты большой сосуд и узкая манометрическая трубка, ибо тогда остается из 3-х (§ 53 формула C и § 54) членов только один, так как $t = 0$, ибо температура внутри глубоких слоев земли может быть сочтена неизменною в короткое время нескольких суток, а величина w чрезвычайно мала, а потому хотя бы n было велико, весь третий член совпадает с погрешностями наблюдения, ибо k_2 очень мало. Пусть давление, при коем заперт кран моего постоянного дифференциального барометра, будет даже = 800 мм., и пусть произойдет наибольшее изменение, то есть пусть n будет = 400 мм., что отвечает изменению давления на 50 мм. ртутного столба. Диаметр моего манометра около 4 мм., следовательно емкость 1-го мм. в манометре или $v = 0{,}0124$ куб. сант., значение же V или емкость сосуда с воздухом = 56000 куб. сант., и потому $w = \frac{v}{V} = 0{,}0000002$, а $k_2 = B_0 w = 0{,}00016$, а потому тогда значение всего 3-го члена $k_2 n$ будет = 0,06 мм. или не более $\frac{1}{800}$ всей наблюденной величины изменения давления. При обычных меньших переменах давлений значение 3-го члена совпадает с неизбежными погрешностями наблюдений как B_0, так и D. Так при перемене давления на 10 мм. ртутного столба 3-й член $k_2 n$ будет в обычных условиях = 0,011 мм. ртутного столба. Поэтому только для точнейших определений должно в этом дифференциальном барометре применять формулу

$$x = D\frac{S-e}{Hg} + B_0\frac{v}{V}n,$$

а для тех случаев, когда желаемая точность достигает 0,02—0,03 мм. ртутного столба, совершенно достаточно одного первого члена, если взять сосуд, столь большой, как у меня, а манометр, такой узкий, как в этом примере. При меньшем сосуде можно брать для достижения такого же результата манометр, еще более узкий.

§ 57

Важнейшее практическое применение, какое может иметь дифференциальный барометр, состоит в возможности определения при его помощи таких небольших разностей высот почвы или строений, какие не могут определяться с достаточною степенью точности ни ртутным, ни голостерическим (анероидным) барометром. Показания ртутного барометра требуют многих поправок, и малые разности барометрических высот не могут быть им легко определяемы особенно при переносном инструменте уже по одной той причине, что при ртутном барометре каждый раз необходимо определять всю барометрическую высоту, а в ней даже тонкий наблюдатель, как Реньо, при постоянном месте на-

блюдения, считает всегда возможною погрешность в $^1/_{10}$ мм., при переносном же барометре едва ли можно ручаться, в обычных ныне системах устройства, за точность, бо́льшую $^1/_5$ мм., хотя бы отчет и был очень точен. Достаточно для этого одной капиллярной погрешности, которая велика в переносных барометрах, ибо они делаются с тонкою (в 5—8 мм.) трубкою. Притом каждому миллиметру ртутного столба отвечает перемена высоты около в 9—11 метров, а потому, считая погрешность даже не более $^1/_{10}$ на каждом месте наблюдения, получим возможность погрешности при малых разностях высот в 2 метра. При больших разностях высот погрешность эта может возрастать. Она уменьшается только при продолжительном ряде параллельных определений на постоянных, сличенных между собою барометрах.

Определение высот анероидами или голостерическими барометрами представляет громадные выгоды пред определением ртутными барометрами, ибо переноска прибора очень легка, но степень неточности результатов здесь не меньше, а даже больше, чем у ртутных барометров, потому что сверх многих поправок, необходимых в этом, как и в ртутном барометре, здесь совершаются еще изменения в показании стрелки, зависящие от невозможности устройства вполне совершенных и в то же время достаточно легких зубчатых сцеплений. По этой причине без всякой перемены давления анероид отличнейшего устройства может показывать на 0,5, даже на 1,0 мм. разницы, смотря по тому, сообщен ли ему или нет толчок и в каком направлении. В этом каждый может легко убедиться, будет ли анероид наблюдаем в лежачем или висячем положении. Если он пришел в равновесие, то стоит по стеклу его с разных сторон делать легкие уда́ры пальцем, чтобы заставить стрелку встать в иное от прежнего положение, которое может при новом ударе возвратиться в прежнее, ибо в системе сцеплений анероида возможно несколько равновесных положений. Поэтому нельзя ручаться за те определения высот, которые производятся вполне выверенными анероидами даже в пределе 5—10 метров.

Дифференциальный барометр, основанный на упругости воздуха, дает возможность определения разностей высот с точностью, гораздо бо́льшею, особенно, если вся разность высот не велика и места определения не далеки друг от друга. Так как 1-му мм. ртутного столба в дифференциальном барометре отвечает 15—16 миллиметров нефтяного столба, то перемене высот места на 700—800 миллиметров (0,7—0,8 метра) отвечает изменение высот нефтяного столба, равное 1-му миллиметру, то есть величине, легко на глаз делимой на 10—20 частей. По этой причине дифференциальный барометр, запертый на полу и поднятый до высоты глаз, показывает уже различие уровней в обеих ветвях манометра около на 2 миллиметра. Если наблюдать дифференциальный барометр трубою катетометра, дающего легкую возможность отчитывать и определять разность уровней в $^1/_{100}$ миллиметра, то достаточно поднять прибор на сантиметр, чтобы не только видеть, но и отчитывать части этой разности. Существеннейшее преимущество моего дифференциального барометра, в отношении измерения высот, пред другими родами барометров состоит в том, что на одном месте

наблюдения, где кран запирается, нет нужды в отчете высот, ибо уровни масла в обеих ветвях манометра тогда одинаковы. Поэтому дифференциальным барометром, когда в нем нет температурных изменений или произведена на них поправка, высота определяется собственно из данных одного только второго места наблюдения, а потому погрешность отчета высот входит здесь один раз, тогда как в данных других барометров она входит два раза.

На основании этих соображений дифференциальный барометр может служить прибором для простого и скорого определения разностей высот, то есть для нивеллирования местности, особенно тогда, когда определяемые пункты отстоят недалеко друг от друга, и особенно, когда в искомой разности высот можно допустить погрешности в дециметр или около того. Тогда достаточно отчет производить на глаз, читая десятые доли миллиметра, что упрощает устройство прибора и наблюдение за ним. Таковые требования чрезвычайно часты в практике, где погрешность в 2—3 дециметра высоты обыкновенно не имеет значения, ибо впадает в предел обычных неровностей почвы, которые при точнейшем нивеллировании уничтожаются только при помощи особых искусственных знаков, от коих считаются уровни. При проектировании и вымерении земляных и гидравлических работ, особенно при осушении местности, то есть при определении направления и величины скатов на значительных расстояниях, при проектировании направления железных дорог и других путей сообщения, особенно в местах скалистых и лесистых, где обыкновенное нивеллирование очень медленно и трудно; при подземных горных и инженерных работах, при съемке местностей для составления подробных карт с означением уклонов почвы, при геологических исследованиях, а именно при определении падения почти горизонтальных пластов и во множестве тому подобных практических частых случаев та степень точности в нивеллировании, какая легко достигается дифференциальным барометром, совершенно достаточна. Во многих из этих случаев обычное инструментальное нивеллирование медленно и трудно, а потому и дорого, а притом и трудно проверяемо, хотя и может достигать большой точности. Ни ртутный, ни анероидный барометр не могут дать таких подробностей рельефа земли, которые доставит дифференциальный барометр, который притом может быть легко сделан переносным и прочным. Полагаю, что для быстрых и возможно точных измерений, необходимых при вышеуказанных практических требованиях, лучше всего соединить выверенный анероид с дифференциальным барометром. Первый даст большие изменения высот и укажет перемены абсолютной величины давлений (то есть приближенные B_0, нужные для расчета x, см. § 53), а второй послужит для определения подробностей в рельефе местности. Если снимаемая местность представляет большие крутизны и горы, то для определения высот должна служить комбинация обоих барометров, а если неровности места не велики, то для самой съемки будет служить только дифференциальный барометр. В этом последнем случае он может быть точно применен и без определения анероидом или другим прибором абсолютной величины атмосферного давления, как указано далее. В практическом от-

ношении особенно выгодным будет такое нивеллирование пред обычным инструментальным там, где лес, болото, холмы, здания и т. п. препятствия мешают действию обыкновенными нивеллирами. При этом, прибегая к нивеллированию дифференциальным барометром, можно значительно сократить не только время, но и расходы съемки, потому что избегаются просеки, необходимые для действия обычными нивеллирами в лесистом месте. В подземных работах выгоды еще значительнее.

Предлагая дифференциальный барометр для практической цели нивеллирования, я считаю неизбежным остановиться далее: на изложении необходимых теоретических понятий в простейшей форме; на описании различных видов легко переносимого дифференциального барометра, испытанных мною на опыте; на указании способов наблюдений и расчета данных в разных случаях и на определении степени точности, достижимой в разных обстоятельствах. [1]

§ 58

Выразим атмосферное давление H_1 в граммах на квадратный сантиметр. Для этого, если наблюдена барометрическая высота B_1 сантиметров и плотность ртути $= Hg$, должно эти величины перемножить: $H_1 = B_1 \cdot Hg$. Так общепринятое нормальное давление 760 миллиметров ртути при 0° отвечает давлению 1033,3 грамма на кв. сантиметр.

Назовем чрез H_0 давление атмосферы на некотором уровне A. Если поднимемся от него на h сантиметров, в место B, то давление будет меньше $= H_0 - y$. Эта разность давлений y (в граммах на кв. сант.) может служить для определения h, если известна средняя плотность e (то есть вес куб. сантиметра воздуха в граммах) воздуха между A и B, потому что давление при переходе из A в B оттого и уменьшается, что столб воздуха высотою h производит прибыль давления в A противу B. Очевидно, что вес столба воздуха h, давящий на квадратный сантиметр, будет he. Разность давлений в A и B будет равна весу этого столба, то-есть

$$y = he. \quad [2]$$

---

[1] Предварительное сообщение о дифференциальном барометре и о его применении к определению высот сделано было мною в мартовском и майском заседаниях 1873 г. Физического Общества, см. журнал Русского Химического и Физического Обществ 000[=172 и 174].

[2] Весьма важно при расчете обратить надлежащее внимание на знаки. Очевидно, что если барометр покажет прибыль давления при переносе из A в B, то B ниже A; Прибыль давления выразится, судя по условию, принятому в предшествующих параграфах, положительною величиною (считая, как указано в § 53, высоты нефти от уровня в открытой ветви манометра), а потому тогда y величина положительная, следовательно и h положительная, а потому h *означает высоту того места* A, *в коем заперт кран, над тем местом* B, *в котором сделано определение разности давления на дифференциальном или другом барометре*. Если желают при расчетах иметь по наблюденному y высоту от того пункта A, где кран заперт, то y должно брать с отрицательным знаком. Пусть, например, из A перешли в B и определили, что давление здесь меньше, чем в A (x отрицательно), y выйдет отрицательное; взятое с противным знаком, оно дает положительную высоту h, то есть покажет, что B выше A.

Отсюда

$$h = \frac{y}{e}. \qquad \text{I}$$

Следовательно, если величины y и e известны, то по ним определим h, разность высот. Величина y определяется наблюдением стояний барометра в A и B или прямо дается дифференциальным барометром, запертым в A и наблюденным в B, а величина e может быть определена или особыми наблюдениями (давления, температуры и влажности в A и B), или же может быть найдена при помощи самого дифференциального барометра. Мы сперва и остановимся над определением e по разным способам, а потом обратимся к y.

Если в данном месте наблюдено ртутным барометром давление B при 0°, температура воздуха T_1, и давление водяного пара f_1, то, если (см. § 28, стр. 65[=326, 325]) вес куб. сант. воздуха при 0° и 760 мм$_1$ давления $= e_0$, в этом месте вес куб. сантиметра воздуха $= e_1$ в наблюденных условиях:

$$e_1 = e_0 \frac{B_1 - 0{,}377\, f_1}{(1 - 0{,}00367\, T_1)760}.$$

Пусть этот вес e_1 куб. сантиметра воздуха отвечает месту A и пусть в месте B он равен e_2. Плотность e_2 будет отличаться от плотности e_1 не только по той причине, что в B давление B_2, температура T_2 и упругость паров f_2 различны от A, но и потому еще, что e_0 отличается, смотря по возвышению места B над A и по его географической широте, а именно зависит от изменения напряжения тяжести. Зная e_1 и e_2 для определения e, то есть средней плотности воздуха между A и B, необходимо знать закон изменения температуры, давления и содержания влаги с возвышением слоев воздуха. Законы изменения этих величин нельзя считать ни постоянными, ни хорошо исследованными. Воздушные поднятия Гей-Люссака, Барраля, Флешера, Рыкачева и многих других показали, что прежние сведения об этих законах далеко недостаточны, что при разном состоянии погоды они изменяются и что в них представляются иногда замечательные отступления, а потому, допуская простейшие возможные предположения, мы не дальше удаляемся от истины, чем вводя тот или другой закон изменения этих величин с высотою атмосферного слоя. Вопрос об определении средней плотности e, весьма существенный при барометрическом определении больших высот, например высоких гор, значительно упрощается при определении малых высот h, для которых одних по существу дела и назначается дифференциальный барометр, ибо при этом самые значения e_1 и e_2 столь мало между собою отличаются, что отличие впадает в пределы неизбежных погрешностей наблюдения, и приняв

$$e = \frac{e_1 + e_2}{2}, \qquad \text{II}$$

мы конечно не уйдем от истины далее пределов погрешности наблюдения. В обыкновенных, устраиваемых мною для нивеллирования дифференциальных барометрах, столб нефтяного масла таков, что при

помощи прибора нельзя сразу определять разности высот бо́льшие, чем в 100—150 метров. Пусть уровни A и B отличаются около на 100 метров и примем в месте A значение $e_0 = 0{,}00129469$, как это есть на месте моего наблюдения (стр. 66[=326]). В B, на высоте 100 метров, значение e_0 будет $= 0{,}00129456$, [1] разность, очевидно впадающая в погрешность точнейших наблюдений, ибо даже в нормальных определениях у Реньо погрешность в $e = \pm 0{,}00000012$. Следовательно, e_0 в A и B должно считать постоянным. Пусть в A и B температуры суть 10°,00 и 9°,3, [2] а давления 760 и 750 мм. при 0° (упругости паров не приводим, то-есть принимаем, что давления уже исправлены по отношению к ней), тогда вес куб. сант. воздуха в A или $e_1 = 0{,}0012459$, а в B значение $e_2 = 0{,}0012325$. Поэтому (II) приняв $e = \frac{e_1 + e_2}{2} = 0{,}0012390$. по формуле же I имеем для нашего случая

$$h = \frac{(76{,}0 - 75{,}0)\,13{,}596}{0{,}0012392} = 10\,972 \text{ сантиметрам.}$$

По данным $H = 760$, $h = 750$, $T_1 = 0$, $T^1 = 0$ (температуры ртути вверху и внизу), $t = 10°$, $t' = 9{,}3$ и по общеупотребимой гипсометрической формуле Лапласа и Матье [3] получаем высоту в метрах, если широта $= 60°$, $Z = 109{,}68$ м., разнящуюся только на 4 сантиметра от вышенайденной. Такая разность впадает в предел погрешностей расчета, принятого в гипсометрических формулах. Если вместо $e = \frac{e_1 + e_2}{2}$ примем даже e_1, то получим $h = 10913$, то-есть сделаем ошибку только на $^1/_{186}$. Если же вся высота h не более 10—20 метров, как это и бывает при нивеллировании на недалеких расстояниях даже при значительном падении, то вся разность, происходящая от замены e даже посредством e_1, не превзойдет 0,05—0,10 метра, то есть будет в пределах неизбежных погрешностей наблюдения.

Итак значение средней плотности можно с уверенностию принять равным среднему арифметическому значению плотностей воздуха в A и B (т. е. принять II).

Для определения значения e_1 в данном месте наблюдения есть много средств. Точнейшее состоит в определении давления, температуры и влажности воздуха в месте наблюдения, но оно мало практично и в своей полноте неприменимо к практическому делу измерения вы-

[1] Приняв 6360000 м. за R, радиус земли, имеем, для отношения напряжений тяжести, что $g_2 : g_1 = R^2 : (R + 100)^2 = 1 : 1 - 0{,}000032$. В том же отношении изменится и e_0, а потому, пренебрегая величинами этого рода, мы сделаем в высоте места погрешность не более 2 миллиметров на 100 метров, а такая погрешность лежит глубоко в пределе возможных погрешностей опыта. Если массу килограмма счесть постоянною, а вес изменчивым, с изменением g, то есть, если измерять веса и давления абсолютными величинами, то выраженный тогда вес e_0 конечно останется во всех местах тем же самым.

[2] Считая, вместе с Глешером, что в ясную погоду на первые 500 метров поднятия от земли температура понижается на 4°, а в туманную погоду на 3°, выйдет на 100 метров поднятия в первом случае 9,2, во втором 9,4. Взято среднее.

[3] Annuaire publié par le Bureau des Longitudes.

сот потому уже, что требует продолжительных наблюдений. Нередко довольствуются одним определением давления и температуры, но тогда при летних температурах, когда упругость паров меняется от 5 до 30 мм., можно иметь ошибку, достигающую до 0,000013 (на 0,001200, то-есть $^1/_{100}$ веса), что может отвечать погрешности в $^1/_{100}$ определяемой высоты. [1] При малых разностях высот даже такая погрешность, конечно, не имеет существенного значения, а потому для определения высот дифференциальным барометром достаточно точно определять значение e при помощи наблюдения температур и давления воздуха, а именно принять:

$$e = 0{,}00129\,\frac{B_0}{760}\,\frac{1}{1+\alpha t},$$

где B_0 означает давление в миллиметрах ртутного столба при 0°. Не менее точна (ибо в ней принята во внимание половина давления водяного пара, отвечающая температуре воздуха t) следующая формула, удобная для вычисления:

$$e = \frac{115 + 0{,}16\,(H - 700) - 0{,}46\,(t - 10)}{100\,000}. \qquad \text{III}$$

Таким образом значение e определится, зная давление и температуры воздуха в A и B и взяв среднее из каждого из них и подставляя в формулу III. Но при этом, очевидно, необходимо иметь выверенный барометр, дающий абсолютные показания давлений, и на каждом месте наблюдения определять температуру воздуха. Это затрудняет ход определения высот и, если не требуется большой точности, особенно при небольших разностях высот такое затруднение совершенно излишне. Если на постоянном исходном пункте наблюдений иметь барометр и знать начальное давление, а по показанию дифференциального барометра знать его изменение, да определять по термометру, находящемуся при приборе, температуру воздуха, то e определится с достаточною точностью для h, меньших, чем 20—30 метров, если даже в B будет погрешность в 5 мм. ртутного столба, а в температуре воздуха в 2—3°, ибо, тогда погрешность в e будет не более 0,00002, а она отвечает при высоте h в 10 метров ошибке в 17 сантиметров.

Для определения e можно пользоваться еще следующим способом, не представляющим никаких практических затруднений. На данном месте, где желательно знать e, должно поставить открытый дифференциальный барометр на землю, закрыть кран, поднять на некоторую определенную высоту, например, на 2 метра, и на ней сделать отчет по манометру. Это определение легко повторить, начиная сверху, то есть отворив там кран, затворяя его там же и делая отчет внизу, ибо тогда все погрешности (объема и температуры) в среднем результате уничтожаются. Повторяя это легкое определение, найдем среднее поднятие и падение нефтяного масла, отвечающее определенному подня-

[1] Обычные гипсометрические наблюдения страдают преимущественно отсутствием поправки на влажность. Формулы Лапласа и Матье не заключают ее значений в местах наблюдения. Бессель ввел поправку на влажность, но многие наблюдатели ее и поныне упускают.

тию или такому же опусканию прибора. Пусть высота этого поднятия $= h_1$ сантиметров и пусть поднятие нефтяного масла в манометре равно D_1 миллиметров, плотность масла $= S$. Если опыт производится быстро и если прибор защищен от скорых изменений температуры, то не будет заметных перемен температур, а изменение объема воздуха резервуара не будет оказывать влияния н. средний результат D_1, потому что при отчете вверху объем воздуха более нормального, а при отчете внизу менее нормального. Потому изменение давления, выраженное в граммах на кв. сантиметр, будет

$$(S - e) \cdot \frac{D_1}{10} = h_1 e,$$

где все величины, кроме e, известны. Это изменение и названо в формуле I этого параграфа чрез y, а потому

$$e = \frac{(S-e)D_1}{10h_1} = \frac{SD_1}{10h_1 + D_1}. \qquad \text{IV}$$

Например, если $h_1 = 200$ сантиметрам, $S - e = 0{,}8$, $D_1 = 3{,}08$ мм., получим $e = 0{,}001232$. Точность такого определения даже при простом отчитывании высот масла на глаз по шкале, деленной на миллиметры, может быть легко доведена до $^1/_{20}$ мм., а чрез повторение опыта, при навыке отчета и нониусе при шкале, может быть и бо́льшею, ибо если в единичном опыте и сделана будет погрешность δ, в n опытах, она будет $\frac{\delta}{\sqrt{n}}$. Способ этот может быть применяем и в других случаях, например при взвешиваниях, когда требуется знать плотность воздуха; и здесь точность такого определения может быть увеличена, ибо для наблюдения D_1 можно применить более совершенные средства, чем при нивеллировании. Если при этом высота поднятия достигнет только 2 метров, а точность отчетов высот манометра будет такова, что в D_1 будет погрешность не более $= \frac{1}{100}$ миллиметра, то в определении этим путем e будет погрешность не более 0,000004, а такая точность во многих случаях вполне достаточна. Здесь особенно важно то обстоятельство, что влажность и др. случайные и изменчивые причины перемены плотности воздуха (например, в каменноугольных копях подмесь легкого углеводородного газа, в некоторых местах значительное содержание углекислоты и т. п.) все принимают участие в определении D_1, а для практики не маловажно и то обстоятельство, что для определения e при этом не требуется нового инструмента.

Итак значение e, необходимое для формулы I, определяется или по IV, когда высоты h не велики, и тогда не требуется никаких новых приборов, кроме мерки для поднятия на определенную высоту, [1] или

[1] При этом способе сущность расчета удобопонятна каждому, кто познакомился с прибором, ибо D_1 показывает изменение уровней манометра при поднятии на 2 метра, а если замечено будет изменение уровней D, то оно отвечает поднятию (или опусканию) на искомую высоту h, которая относится к высоте 2-х метров, как D относится к D_1, то-есть $D : D_1 = h : 2$, откуда $h = \frac{2D}{D_1}$ метров.

по III, для чего нужно иметь барометр, например, анероидный. Во всяком случае необходимо e определить в местах A и B и, взяв среднее, подставить найденное в I.

§ 59

Значения y в формуле I § 58 определяются дифференциальным барометром точно теми же способами, какие даны в § 53 и 54 для определения x, только x представляет перемену давления в миллиметрах ртутного столба, а y в граммах на кв. сантиметр, а потому

$$\frac{x}{10} \cdot 13{,}596 = y.$$

Следовательно, судя по формуле C § 53, имеем:

$$y = 1{,}3596\ (k_0 D + k_1 t + k_2 n),$$

где D и n даны в миллиметрах, а y — в граммах на квадратный сантиметр. Подставляя сюда значение k_0 и не считая $t = 0$ и $n = 0$, чего в действительности можно достичь и к чему должно во всяком случае по возможности приблизиться, получим:

$$y = \frac{(S-e)}{10} D + B_0\, 1{,}3596\left[\frac{a}{1+aT_0}\, t + wn\right], \qquad \text{V}$$

где буквы имеют значение то же, что и в § 54. Если места A и B близки, разности их высот не велики, определения совершаются скоро одно за другим и повторены, то можно допустить при известных, далее разобранных предосторожностях, в среднем результате $t = 0$ и $n = 0$. Тогда, подставляя в I значения y по V и e по IV, получаем:

$$h = \frac{\frac{S-e}{10} D}{\frac{S-e}{10} \frac{D_1}{h_1}} = \frac{D}{D_1} h_1. \qquad \text{VI}$$

В этом простейшем виде формула для высот, определяемых дифференциальным барометром, не зависит ни от данных для плотности S нефтяного масла, ни от начального давления B_0, ни от температуры воздуха и только от величины D и D_1, наблюдаемых на манометре прибора, и от постоянной h_1, которая, как определенная мера длины, может быть легко сделана с надлежащею для этого дела точностью. Если примем $h_1 = 2$ метрам, если притом D_1 определено и в A, и в B по нескольку раз, начиная сверху (то есть закрывая наверху кран и делая отчет внизу) и начиная снизу (запирая кран внизу и наблюдая D_1 на верху), то точность в среднем D_1 можно принять гораздо большею, чем в D и, следовательно, если D будет больше D_1, все-таки формула VI дает возможно точное h. Во всяком случае до $h = 5$—10 метрам еще можно с уверенностью ею пользоваться, а такие разности высот чаще всего и встретятся при практических работах на небольшом пространстве. Если же разности высот будут больше этих, то для детального

исследования местности необходимо будет наносить разности высот, не превосходящие таких величин, а потому необходимо будет при быстрых склонах чаще избирать места для определения высот подобно тому, как это делается и при обыкновенном нивеллировании с рейкою. По этим причинам я считаю определение высот дифференциальным барометром по VI наиболее надежным и самым удобным, вследствие чего и разберу в подробности те приемы, которыми достигаются легчайшим образом условия, необходимые для определения высот по формуле VI. Эти условия суть:

a) D и D_1 должны быть определены при возможно одинаковых температурах нефтяного масла, ибо сокращение формулы I в результат VI основывается на том, что в числителе и знаменателе S и S принимаются одинаковыми. Для достижения этого условия, определения D_1 и D должны быть произведены возможно скоро друг за другом.

b) Второе условие есть то, чтобы при определении D в A и B температура воздуха в приборе была одна и та же, то есть чтобы t в V было $= 0$, ибо иначе сокращение, достигнутое в VI, не было бы возможно. Это условие наиболее трудно достижимое, но в практике дела влияние неизбежных небольших неравенств температур может быть устранено при помощи надлежащего способа наблюдения. Наилучшим для того средством считаю следующее. Для нивеллирования возьмем три дифференциальных барометра, из коих два должны быть по возможности подобны друг другу, легки и удобопереносимы. Назовем их $n°$ 1 и $n°$ 2. Третий дифференциальный барометр должен быть больше двух первых, то есть его резервуар окружен бо́льшею массою воды и он сам — возможно худыми проводниками тепла. Во все время наблюдения этот $n°$ 3 остается на начальном пункте A, а потому может быть более массивен. Это необходимо для того, чтобы в нем совершались или незаметно малые перемены температур в то время, которое достаточно для перехода из A в D, для наблюдения в D и возвращения в A, или за совершающимися изменениями температуры можно было бы следить точным термометром, по которому показания $n°$ 3 освобождаются от влияния изменения температур. Если для перехода в B и возврата в A достаточно 10—15 минут, даже 30′, то в это время легко предохранить сколько-либо массивный дифференциальный барометр $n°$ 3, принявший температуру окружающего воздуха и защищенный от солнца и дождя, от изменений температуры с точностью до 0°,01, хотя бы был ветер и температура окружающего воздуха изменилась за это время на 1—2°, в чем с прибором, изображенным на рис. III—3, я убедился многократным опытом. Барометр $n°$ 3 будет служить для того, чтобы следить за изменением атмосферного давления во все время наблюдения. Предположим теперь, *что все три прибора на месте A приняли температуру воздуха*. При помощи приборов $n°$ 1 и $n°$ 2 сделаем в A определения D_1, начиная сверху и снизу. Получится 4 значения: два при прибывающем и два при убывающем объеме. Тогда запрем единовременно краны во всех трех барометрах и перенесем $n°$ 1 и $n°$ 2 из A в B. Там сделаем отчет. Получится 2 значения D. Назовем среднее из них чрез D_2. В это время в A должно быть произведено определение высоты

уровня в манометре. Оно покажет изменение давления, происшедшее в течение времени перехода в B. Наблюденное D_2 должно быть освобождено от этого влияния. Так, если в это время давление увеличилось, то получится на $n°$ 3 поднятие масла в закрытой ветви и эту величину (во всяком случае малую) должно отнять от наблюденных D при получении D_2. Когда D_2 определено, кран одного из дифференциальных барометров, например, $n°$ 1, открывается и им в B делается два (начиная сверху и снизу) определения D_1. Потом в B кран $n°$ 1 закрывается, когда $n°$ 2 показывает $+D_3$ (исправленное на изменение давления, наблюденное в $n°$ 3) и оба прибора $n°$ 1 и $n°$ 2 переносятся в A. Пусть тогда показание прибора $n°$ 1 будет D_4 (опять освобожденное от временной перемены давления по $n°$ 3), а показание прибора $n°$ 2 (освобожденное по $n°$ 3 от перемены давления по времени) означим чрез $+d$. Если бы температура нисколько не изменилась при переходе из A в B и обратно, то d было бы $= 0$, следовательно, $+d$ показывает все изменение, зависящее от температуры.

Если $n°$ 1 и $n°$ 2 имеют одинаковое устройство и все время были в одних условиях, то в них можно считать все температурные изменения одинаковыми, а потому с $n°$ 1 произошло то же изменение $+d$ во все время опыта. Это изменение конечно будет очень невелико, если A и B недалеки друг от друга и оба прибора защищены от быстрых температурных изменений, как описано в следующих параграфах. Все изменение $+d$ можно считать пропорциональным времени и его разделить на три части: первая треть на перенос A — B, вторая на время наблюдения в B и третья на B — A. Поэтому к[1] D_2 и к $-D_4$ должно приложить $-\frac{d}{3}$; если полученные числа будут согласны в пределах погрешностей отчета, то принятая гипотеза о температурном изменении справедлива, если же этого согласия не будет, то по полученной разности можно судить о температурных изменениях в первой и последней третях всего времени, тем более, что о последней трети можно сделать суждение не только по D_1, но и по D_3. В обычных условиях вся температурная поправка будет ничтожно мала, если расстояния не велики. Если же в действительности будут замечены большие температурные изменения, то необходимо прибегнуть к термометрам, и отчет манометра освободить от влияния температуры по § 54. Пусть, например, показание манометра будет $+D$ (то есть давление наружное возросло, уровень закрытой ветви выше), а температура возросла (t = положительной величине) на $t°$; для приведения к первоначальной температуре должно к D прибавить $k_1 \frac{t \cdot 13{,}596}{S - e}$, где значения букв те же, что и в § 54. Поэтому или прямо — расположением прибора и способов наблюдения — или наблюдением на термометре величины D можно освободить от температурных изменений.

с) Третье условие, необходимое для применяемости формулы VI, есть постоянство объема воздуха ($n = 0$). Оно прямо достигается в приборах с переменным количеством нефти, ибо в них можно доводить

[1] [В подлиннике „в D_2". *Прим. ред.*].

в B уровень масла в закрытой ветви до того же положения, какое он занимал в A, причем объем воздуха и будет тот же. В приборах с постоянным количеством нефти изменения в объеме будут тем меньше, чем меньше w, и потому здесь должно брать возможно тонкие манометрические трубки, так как в переносном приборе сосуд для воздуха нельзя сделать большим. Замеченные изменения в объемах могут служить для поправки наблюденных D. Еще проще так расположить наблюдения, чтобы средний результат был здесь свободен от перемены объема. Для этого, сделав наблюдение D_2 при переходе $A — B$, когда кран был заперт в A, следует сделать другое при переходе $B — A$ и найти D_1. Если в первом случае объем возрос, то во втором он на столько же убавится, и обратно; средний результат будет, значит, свободен и от этого влияния.

§ 60

Простейшая форма нивеллирования дифференциальным барометром есть та, когда имеется один прибор, и он не снабжен ни термометром, ни анероидом, ни приспособлением для изменения объема нефти, но, однако, возможно хорошо защищен от скорых изменений температур. Пусть требуется определить разность высот мест A, B и C. Оставим в A прибор на долгое время, чтобы он принял температуру воздуха, и, определив D, запрем кран, перейдем в B, получим разность высот масла D_2. Кран отворим и опять затворим в B и перейдем в A, получится D_3. Тогда перейдем, не отворяя крана, опять в B. Пусть тогда получится отчет d. Он должен быть сочтен за изменение, зависящее от перемен температуры и давления, ибо, если бы они сохранились, d было бы $= 0$. $\frac{d}{2}$ представит изменение во время одного перехода и эту величину должно придать к D_2 и D_3, чтобы привести их к начальным давлению и температуре. Среднее из исправленных D_2 и D_3 даст разность, свободную от всех перемен, если считать их пропорциональными времени и если расположить все три наблюдения на равных промежутках времени. Затем в B следует определить D_1. Среднее из двух D_1, найденных в A и B, надо вставить в VI и тогда получится разность h высот A и B. Тогда тем же путем должно определить разность высот B и C. Если определение повторить раза два и проверить, перейдя прямо из A в C, то в среднем при небольших расстояниях крайних точек (например, в 2—3 версты) должно получить результат, удовлетворяющий обычным практическим потребностям, особенно если для наблюдений будет избрано время без дождя и не очень жаркое. Подобный прием испытан был мною в деревне Боблово, Московской губернии, для определения высоты поднятия от одного камня, под горою, до другого, на горе. Восемь сделанных определений дали в среднем результате [1] разность высот 41,72 метра, причем наибольшая разность от среднего была получена для полуденного наблюдения в жаркий день, и она рав-

[1] Способ наблюдения отличался от вышеописанного только тем, что я определял ϵ по барометру и термометру, да при таких разностях высот D_1 и не дает достаточной точности.

вилась 1,23 метра, вероятная же погрешность среднего 41,72 метра оказалась ±0,09 метра. Для этого данного я не имеют проверки, потому что надлежащего нивеллирования в этом месте сделано не было. Но в то же время и при помощи того же прибора, устроенного простейшим образом, произведено было большое число раз (23) определение небольшой высоты, для которой непосредственное измерение дало 380 сантиметров. Определения, сделанные при помощи дифференциального барометра, все были в пределе от 392 сантиметров до 375, среднее число получилось 383 сантиметра ±1,8, вероятная погрешность отдельного наблюдения ±9. Должно заметить, что при этих определениях не было взято ни термометра, ни барометра, и избирались самые разнообразные часы дня и разные состояния погоды (летней), чтобы узнать, не оказывают ли они заметного влияния на результат измерения. Этого влияния не было видно, за тем исключением, что опять в самое жаркое время дня получались числа, наиболее далекие от истины, а наилучшие результаты получены в облачные дни. Направление ветра и его сила положительно не оказывали заметного влияния на результат.

Прибавка второго и, как выше было указано, третьего постоянного дифференциального барометра для определения совершающихся во время наблюдений перемен атмосферного давления, а затем прибавка к каждому прибору точных и чувствительных термометров [1] и приблизительное знание атмосферного давления по барометру (например, по выверенному анероиду) придадут наблюдениям этого рода гораздо большую точность. Чтобы показать ту форму наблюдений, от которых можно ожидать наибольшей точности, я представлю случай определения разности высот двух удаленных друг от друга пунктов, например конечных пунктов нивеллирования, возвышающихся, однако, один над другим настолько, чтобы одним манометром переносного прибора можно было измерить разность барометрического давления в обоих пунктах. Для правильности хода наблюдений при этом полезно иметь три полных и изученных [2] дифференциальных барометра. Заперев их все в *A*, два должно перенести в *B*. Для того, чтобы при долгом переходе или перевозе, при которых могут встретиться значительные высоты или спуски, не произошло перебрасывания нефти из манометра в воздушный резервуар или в открытый конец манометра, необходимо иметь в дифференциальных барометрах кран, разобщающий от действия внешнего воздуха. Этот кран можно помещать или между манометром и резервуаром (как например в приборе рис. III—4 кран *y*), или же на свободном конце манометра (как на рис. III—1, кран *m*, или на рис. X—2 кран *n*). Назовем этот кран прибавочным. Когда он заперт, уровни масла в манометре не меняются, хотя бы давления и температуры значительно менялись, что и может быть при дальном переходе. На месте *B* сперва в обоих принесенных дифференциальных барометрах должно искусственно довести температуру приблизительно до той,

[1] Я употребляю при дифференциальных барометрах термометры, градус которых делен на 50 частей, так что с лупою видны тысячные доли градуса.

[2] То есть таких, для каждого из коих k_0, k_1 и k_2 особо и тщательно определены.

какую они имели в момент закрытия кранов. [1] Это достигается чрез прибавку холодной или теплой воды к воде, окружающей резервуар, или чрез погружение всего прибора в воду надлежащей температуры. Когда барометры приняли приблизительно прежнюю температуру, прибавочные краны открываются и в обоих барометрах делается в течение заранее определенного времени несколько наблюдений чрез определенные промежутки времени. В это условленное время в A должны быть произведены подобные же полные наблюдения при температуре, близкой к начальной. Сличение исправленных показаний в A и B даст разность давлений в A и B. Для убеждения в исправности отчетов и состояния переносных приборов будет служить согласие их показаний. Когда надлежащие наблюдения сделаны, один из приборов относится обратно в A с запертыми кранами и в определенное время, когда и в B делается полный отчет, сличается с прибором, оставленным в A, доведя искусственно температуру до начальной или, по крайней мере, почти до одинаковой в принесенном и остававшемся в A приборе. Согласие в пределах допускаемых ошибок исправленных показаний этих обоих приборов послужит ручательством исправности приборов и наблюдений, а сличение наблюдений, одновременно произведенных теперь в A на двух, а в B на одном приборе, послужит к увеличению числа наблюдений над разностию давлений в обоих местах, ибо увеличение числа наблюдений на сличенных барометрах увеличивает точность результата. Если имеется целый ряд единовременных наблюдений в A и B, перемежающихся со сличением самых барометров в одном из мест и при близкой температуре, то в среднем числе, очевидно, будет значительная точность, если каждое число будет отдельно исправлено во всех отношениях. Сличение, сделанное Рюльманом [2] многих определений высот ртутными барометрами, показывает это с несомненною очевидностью. Он вывел, что в годовом результате разность давлений точно отвечает разности высот даже очень дальных мест. Эти же сличения показали, что ночные и зимние наблюдения дают высоту, всегда меньшую действительной, а дневные и летние — бо́льшую, но разность от истины в обоих случаях представляет небольшие уклонения от всей высоты $\left(\text{наибольшее } \frac{1}{90}\right)$, а как переносный дифференциальный барометр может с удобством применяться только для сличения высот не более как [3] в 100—150 метров, то подобные вышеуказанные укло-

[1] Дабы ту температуру, которую имели приборы в A, легко можно было вновь получить в B, лучше уже в A сообразно с обстоятельствами поднять ее или понизить противу окружающей. Так если в A наблюдение было в полдень, а в B ожидается вечером, должно понизить.

[2] Poggendorff's Annalen T. 139—160.

[3] Для больших высот можно было бы применять шары с краном, помещенные в тающий лед и по временам переносимые из одного места в другое, а в местах наблюдения соединяемые с высокими масляными манометрами. В малом переносном дифференциальном барометре можно искусственным возвышением или понижением температуры достичь того, чтобы упругость сделалась такою же, как и в месте, значительно отличающемся по давлению. Тогда результат будет зависеть главнейшим образом от показаний термометра. Применяя серную кислоту или глицерин, а также и самую ртуть для наполнения манометра, можно также достичь выгоды в высоте манометра.

нения для зимнего и летнего времени здесь будут обыкновенно впадать в погрешности наблюдений. Причина этих уклонений, зависящая по мнению Рюльмана от того, что близ почвы термометр не показывает истинной температуры воздушных слоев, едва ли не проще всего объясняется отсутствием надлежащей поправки на степень влажности воздуха. Если применять дифференциальный барометр средством для определения самых плотностей воздуха, а именно в A и B сделать определения e при поднятии барометра на довольно значительную, определенную высоту (например на высоту дерева или дома), то тогда исчезнет и этот повод к погрешности в определении разностей высот. [1] Считаю, однако, не излишним заметить еще раз, что для больших разностей высот и для больших расстояний мест наблюдения я не считаю выгодным замену ртутного барометра дифференциальным, роль которого в этом деле состоит в скором определении малых разностей высот в местах, не далеко отстоящих друг от друга, чего нельзя узнать при помощи ртутного барометра. Рассмотрение возможных погрешностей в барометрическом определении высот ясно показывает роль ртутного и нефтяного барометров в этом деле.

§ 61

Возможная погрешность $d(h)$ в разности высот h (в сантиметрах зависит от погрешности $d(y)$ в определении разности давлений y (в граммах на кв. сант.) и от погрешности $d(e)$ в определении e, то есть веса куб. сантиметра воздуха, ибо $h = \frac{y}{e}$, а потому имеем

$$h + d(h) = \frac{y + d(y)}{e - d(e)},$$

отсюда, пренебрегая малыми величинами высших порядков:

$$d(h) = \frac{1}{e}[d(y) + h d(e)]. \qquad \text{VII}$$

Погрешность $d(e)$ в определении веса куб. сант. воздуха должно считать одинаковою при употреблении ртутного или дифференциального барометров, а потому вся разность степени точности зависит от погрешности $d(y)$ в определении y разности давлений. При определении давлений ртутным барометром необходимо допустить на каждом

[1] Поднятие дифференциального барометра на значительную, определенную высоту, например на 10 метров, может служить точным средством для наблюдения за ходом в изменении плотности воздуха в разные времена и может дать новое проверочное метеорологическое данное для объяснения замечаемых явлений атмосферы, ибо в плотности воздуха выражается совокупность давления, температуры и влажности воздуха. Для удобства наблюдений этого рода должно было бы устроить дело так, чтобы прибор поднимался на высоту на блоке и веревке и после поднятия на определенную высоту, при начале опускания, кран сам собою закрывался бы, задевая при начале опускания за особый, для этого устроенный храповик. Тогда при конце опускания должно было бы тотчас произвести отчет высоты и можно было бы считать температуру постоянною.

месте наблюдения погрешность (при всех поправках) по крайней мере в 0,1 мм. или 0,01 сантиметра (принимая, что давления и высоты здесь выражены сантиметрами), а такая разность в двух местах может дать возможную погрешность в разности (y), равную 0,02 сант., что равно в давлении (граммы на кв. сант.) 0,27, а потому для ртутного барометра возможное $d(y) = 0{,}27$. [1] В нефтяном барометре при надлежащих предосторожностях, даже при значительных расстояниях, невозможна бо́льшая погрешность в исправленном результате, как в 1 мм., ибо погрешность сводится только на наблюдение в одном месте, а отчет даже простым глазом может быть точен до 0,1 мм. в манометре и 0,01 в температуре, если шкала термометра делена на 1/50°, а в манометре на 1 мм. Даже такая значительная погрешность, выраженная в давлениях, $= 0{,}08$ гр. на кв. сантиметр. При малых расстояниях, а потому при малой погрешности температур нельзя допустить бо́льшей погрешности, как в 0,2 мм., а потому для нефтяного барометра $d(y)$ примем для больших расстояний $= 0{,}08$, а для малых $= 0{,}016$. Погрешность $d(e)$ при наблюдении барометра с точностью до 0,1 мм., температуры воздуха с точностью до 0°,2 и влажности с точностью до 0,05 достигает величины 0,0000015; такую (едва ли не бо́льшую) погрешность можно подозревать во всех обычных гипсометрических определениях, а потому примем $d(e) = 0{,}0000015$, а величина $\dot{e}$ есть близкая к 0,0012. Поэтому для ртутного барометра имеем возможную погрешность (в сантиметрах h и $d(h)$) в определении высоты h:

$$d(h) = 225 + h \cdot 0{,}0013.$$

Точно так же найдем для дифференциального барометра для больших расстояний

$$d_1(h) = 66 + h \cdot 0{,}0013,$$

а для малых расстояний:

$$d_2(h) = 13 + h \cdot 0{,}0013.$$

На основании этих формул находим, что определение высоты с точностью до $^1/_{10}$ ее величины произведено будет при ртутном барометре только тогда, когда разность высот достигает до 23 метров, а при нефтяном барометре на дальних расстояниях при разности высот в 7 метров, а на близких расстояниях при разности высот в $1^1/_3$ метра, а из этого очевидно, что при небольших разностях высот (от 0 до 23 метров) в наблюдениях ртутным барометром можно ждать погрешности, бо́льшей, чем 10% всей величины. При разности высот в 25 ($h = 2500$ сант.) метров можно ждать погрешности по ртутному барометру в 2,3 метра, по дифференциальному на дальнем расстоянии в 0,7 метра, а на малых расстояниях в 0,2 метра. При меньших разностях высоты погрешность будет еще более в пользу дифференциального барометра. Так, при

[1] Для анероида эту погрешность надо принять еще бо́льшею и по крайней мере раз в 5.

разности высот в 3 метра, можно по ртутному барометру погрешить на 2,2 метра, по нефтяному на близких расстояниях на 0,1 метра, на дальних на 0,7 метра. Напротив того, при больших разностях высот на стороне дифференциального барометра не будет выгоды ртутного барометра, а потому тогда и не должно прибегать к дифференциальному барометру. Так, например, при определении высоты горы в 1000 метров ртутным барометром можно ждать погрешности в 3,6 [1] метра, а дифференциальный барометр, если бы он мог быть прямо применен (требуется манометр более метра высотою), дал бы погрешность в 2,0 метра. В действительности придется тогда сделать около 5 отдельных определений, погрешность каждого (D около 250 мм., h около 200 м.) будет около 0,9 метра, следовательно, вся погрешность может быть до 4,5 метра, то есть тогда погрешность может превзойти и ту, какую дает ртутный барометр.

Из этого очевидна та роль, которую может при нивеллировании иметь дифференциальный барометр: им должно определять такие малые разности высот, какие не могут быть определены ртутным барометром с надлежащею степенью точности, а погрешность, которая возможна для дифференциального барометра, приблизительно, есть следующая:

При разности высот в метрах	На близких расстояниях	На дальних расстояниях
1	0,13 метра	0,7 метра
10	0,14 „	0,7 „
50	0,20 „	0,7 „
100	0,26 „	0,8 „
200	0,39 „	0,9 „

Действительная погрешность, особенно в средних из нескольких определений и особенно на близких расстояниях, конечно, будет гораздо меньше этой. Если при требуемой нивеллировке вышеуказанная степень точности достаточна, то дифференциальный барометр может быть применен с пользою, потому что ни ртутный барометр, ни анероид такой точности не дадут, а инструментальное нивеллирование обычными средствами потребует несравненно более времени и средств, особенно в местах, где нужно для того вести просеки, обходить болота и т. п. В большинстве предварительных съемок для строительных и картографических работ указанная степень точности может быть считаема достаточною.

---

[1] Действительная погрешность, как известно, при этом больше, что зависит от неточности определения e, плотности воздуха. Если не делать определения влажности летом, то погрешность e может достичь до 0,00001. Тогда в определении высот в 1000 м. ртутным барометром может быть погрешность до 10 метров. *Влияние погрешности в определении плотности воздуха e особенно велико при значительных высотах*, что и составляет важнейшую причину упрощения определения малых высот, для чего и назначается дифференциальный барометр. Тогда влияние погрешности $d(e)$ не велико.

§ 62

Чтобы закончить статью о применении дифференциального барометра к нивеллированию, остается упомянуть о тех формах этого прибора, которые полезно придать ему для того, чтобы сделать его пригодным для нивеллирования. Формы эти должны удовлетворять преимущественно двум условиям: для практического удобства снаряд должен быть возможно легок, но в то же время для точности результатов он должен возможно хорошо удерживать постоянную температуру. Для удовлетворения второму, важнейшему, условию приходится отчасти пожертвовать первым условием, потому что, увеличивая массу воды, окружающей резервуар прибора, мы делаем его температуру наиболее постоянною, но при этом вес прибора возрастает. Когда речь идет о значительных расстояниях, тогда воду при перевозке можно выпустить и на новом месте влить новую, но когда прибор назначается для постоянной работы на близких расстояниях, тогда необходимо придать всему прибору вместе с водою вес, дозволяющий его легко переносить с места на место. В этом случае нередко могут встретиться такие обстоятельства, что температура быстро меняется, а потому полезно иметь возможность изменять по желанию температуру воды в приборе, и чрез то доводить воздух до температуры, близкой к первоначальной. В малых переносных жестяных приборах, как например прибор, изображенный на рис. X—2, этого можно достичь, погружая весь прибор в воду, более или менее холодную; в приборах бо́льших размеров, каков например тот, который изображен на рис. III—3 и 4, полезно устроить внутри ванны металлическую трубу, проходящую в виде змеевика (рис. III—3 NOR). Вливая в воронку N такого змеевика холодную или теплую воду, можно по произволу и легко менять температуру ванны и воздуха в резервуаре (C, D). Во всяком случае, однако, необходимо в таких переносных приборах иметь: a) воздушный резервуар, окруженный водяною ванною (III—3 AB, V—6 BB и AC); b) эту последнюю защитить снаружи, особенно при переносе, чехлом из худых проводников тепла (бумаги, сукна, меха, дерева); c) пред наблюдением произвести перемешивание воды в ванне. Это последнее необходимо, потому что иначе в верхних частях температура будет выше, чем в нижних. Мешалку (рис. III—3 KM, рис. V—6 SX) лучше всего помещать в центре ванны, ибо тогда легко устроить, чтобы ее движения были легки и не могли вредить другим частям прибора (термометру и сосуду для воздуха). d) В ванне прибора должно поместить при наблюдении термометр (V—4, 5, 6—T; III—3, 4 7), в котором каждый градус делен на 50 или, по крайней мере, на 10 или 20 частей. Так как температуры наблюдения могут быть в разные времена года весьма различны, а термометрам должно для удобства обращения с ними придать небольшую длину, то в полном приборе должно быть несколько последовательных термометров. Так если деления составляют $^1/_{50}°$ и имеют высоту $^1/_3$ мм., то на каждый градус пойдет около 17 мм., а потому если термометрической шкале дать длину около 200 мм., то каждый термометр будет иметь деления только 12°; если же определе-

ния будут производиться от 0° до 24°, то должно иметь по крайней мере 2 термометра. Термометры составят самую ценную составную часть полных дифференциальных приборов, но считаю не излишним напомнить, что при близких расстояниях можно делать определения и без чувствительных термометров, как указано выше (§ 59).

Во всех прочих отношениях устройство дифференциального прибора может подвергаться множеству видоизменений. Для примера укажу на приборы, изображенные на рис. III—3, 4 и V—4, 5 и 6. Первый из этих приборов [1] довольно значительных размеров и содержит все части в наибольшей полноте. Резервуаром для воздуха служат два яйцевидных сосуда *C* и *D* из выдавленной латуни, толщина стенок около $^3/_4$ мм. Оба сосуда соединяются трубкою *E*. Взято два сосуда для того, чтобы воздух, запертый в них, быстро следил за переменами температуры ванны *A*. Оба сосуда закреплены на крышке трубками *HH* и снабжены тонкими, выходящими наружу трубочками *ab* и *cd*. Первая из них сообщена с сушилом *ef* и краном *X* для входа и выхода воздуха, а вторая кончается краном *Y*, ведущим к манометру *hikm*. Этот манометр устроен с переменным количеством нефти, а потому уровень нефти в ветви *hi*, а, следовательно, и объем воздуха, здесь могут быть постоянны (поэтому член с n и k_2 в формуле *C* § 53, 54 уничтожается). Для достижения этого нижние концы *ik* манометрических трубок, вправленные в металлической оправе, сообщаются внутренним отверстием с широкою стеклянною трубкою *n*, в которой двигается плотный поршень *p* при помощи кремальера *r* и зубчатой полосы. Действуя кремальером, можно всегда довести уровень нефти в *hi* до первоначального. В приборе этом миллиметрические деления нанесены на стеклянных трубках манометра, а для ясности отчета и для избежания параллактической погрешности приспособлены лупы *y* и *x*, движущиеся на цилиндрах *op* и *w*. Отвес *Z* дает возможность всегда установить манометр вертикально, термометр *t* показывает температуру нефти в манометре. Весь прибор окружен сукном и деревянным (в разрезе эллиптическим) ящиком *PQ* с вертикальными боковыми стойками *UU*, служащими для укрепления верхней доски и ручки *S*, при помощи которой этот довольно тяжелый прибор можно удобно переносить. Более легкие приборы представляют формы, изображенные на рис. V—5 и на рис. X—2. Оба имеют весьма близкое внутреннее устройство, считаемое мною наиболее приличным для малых переносных приборов. Оно видно в разрезах на рис. V—4 и рис. V—6. Резервуар для воздуха в этих приборах составляет кольцеобразное пространство *D*, находящееся между двумя тянутыми трубками *CC* и *BB*. Оно сверху и снизу закрыто припаянными кольцеобразными днами. В верхнее дно впаяны две тонкие медные трубки *aa* и *bb*, идущие к манометру и сушилу. Внутри трубки *BB*, прикрепленной к крышке прибора, свободно движется центральная мешалка *SX*, на конце которой насажены загнутые

[1] Выполнен в мастерской г. Брауэра. Прибор этот принадлежит ныне военно-топографическому отделу генерального штаба.

перья (как в вентиляторах). При движении мешалки вниз и вверх, вследствие формы этих перьев, вода приходит во вращательное движение, и из внутренней трубы BB выходит наружу в пространство AC, а потому равномерная температура достигается здесь весьма скоро. Воздух резервуара D здесь очень быстро принимает температуру ванны, потому что толщина воздушного слоя BC повсюду одинакова и не велика.

В пространстве между стенками ванны A и наружной CC оболочки воздушного резервуара помещается термометр, который может при переноске умещаться внутрь этого пространства. В приборе, изображенном на рис. V—5, ванна облечена сверх того сукном и деревянным ящиком EF, а в приборе рис. X—2 ванна сделана несколько бо́льших размеров и только при переноске вкладывается в особый мешок из худых проводников тепла. Крышка ванны во всяком случае запаяна, а потому в ванну имеется доступ только чрез отверстия для мешалки и термометра. [1] Что касается до наружных частей обоих приборов, то они понятны из чертежей. Существенное различие приборов, изображенных на рис. V и на рис. X, есть то, что в первом из них манометр с переменным, а во втором с постоянным количеством нефти. В первом манометре уровень нефти в закрытой ветви всегда можно довести до определенного места шкалы при помощи кремальера P, действующего на зубчатку, сообщенную (при помощи каучуковой трубки, придающей сочленению некоторую гибкость, полезную для его прочности и правильности действия) со стеклянным поршнем Q. Он не плотно пришлифован к трубке N, так что свободно движется в ней. В трубке N и части шарика M (а не во всем шарике, как ошибочно изображено на рисунке) налита ртуть, а поверх ее в MH нефтяное масло. При поднятии или опускании поршня ртуть, а за нею и нефть, падают или поднимаются в MH, а потому уровень в H может быть поставлен на желаемую высоту. [2] В приборе, изображенном на рис. X—2, нет приспособлений для приведения уровня нефти всегда на одно место, что значительно упрощает устройство прибора. В этом приборе есть еще та особенность, что на наружной ветви манометра поставлен кран n, который запирается при переноске. Это положение прибавочного крана (см. стр. 154 [=437]) представляет ту выгоду, что тогда нет нужды в полной герметичности крана, тогда как при тех положениях, которые занимают соответственные краны (X на рис. V—5 и Y на рис. III—4) в других приборах, они должны быть точно герметичны. Существенные краны прибора, замыкающие воздух в резервуаре (X на рис. III—4, R на рис. V—5

[1] Прежде такой запайки воздушный резервуар испытывают относительно герметичности, для чего к b примастичивается трубка, погруженная во ртуть, а из a выкачивается воздух. Затем кран R (на трубке a) запирается и по стоянию ртути в стеклянной трубке судят о том, держат ли прибор и кран.

[2] На рис. V—7 изображен способ замастичивания кранов R или K (рис. V—5) на стеклянных трубках. A — конец крана, B — стеклянная трубка, C — наружная широкая трубка, служащая для заливки мастики mm, D — пробка. На рис. V—5 и 4 L есть лупа, загнутая на своей ножке, как это делается при переноске, когда крышки или дверца G (V—4) закрывается. При наблюдении она может быть направлена на манометр.

и V—6, *r* на рис. X—2), во всяком приборе, конечно, должны быть непременно совершенно герметичны, потому что находятся между резервуаром для воздуха и манометром. [1]

Говоря о применениях дифференциальных барометров я должен был бы описать здесь устроенный мною нефтяной воздушный термометр, потому что он есть не что иное, как видоизменение дифференциального барометра, но так как в дальнейших главах будут особо изложены мои термометрические исследования, то я и счел более уместным там же дать описание этого приложения дифференциальных барометров. Краткое описание помещено в журнале Русского химического и физического обществ 1874, стр. 10 [=199].

Ноябрь 1874 г.

---

[1] Для наблюдения на самых близких расстояниях (например, при проведении канав, при земляных работах), когда нет нужды в термометрах и когда притом высоты невелики, устройство дифференциального барометра может быть еще более упрощено даже до того, что достаточно взять любую бутыль, вмастичить в нее трубку с краном или зажимом (а при недостатке их для запора можно брать воск) и другую изогнутую в виде манометра со шкалою и погрузить бутыль в ведро водою, так чтобы манометр был вне ведра. С помощью подобного грубейшего приспособления возможно делать определения с точностью до $^1/_4$ аршина.

Шестая глава

Об изучении стеклянных трубок

§ 63

Определение упругости газов при современных методах наблюдения может быть с точностью произведено только при посредстве наблюдений над высотами столбов жидкостей, уравновешивающих упругость газа. Следовательно, для этой цели необходимо производить наблюдения в трубках, чрез стенки которых возможно определять высоты столбов жидкостей. [1] Выбор соответственных стеклянных трубок составляет одну из задач, весьма важных в практическом отношении, потому что такие трубки должны обладать следующими условиями. 1) Диаметры тех частей трубок, в которых образуются мениски, должны быть равны как вверху, так и внизу или, по крайней мере, они должны быть заранее известны для того, чтобы капиллярное давление было известно. Только для трубок значительных диаметров можно избежать этого условия. При малых давлениях есть возможность применять их, но значительных давлений они не выдерживают. 2) Стенки трубок в тех местах, чрез которые производится отчет положения мениска, должны представлять равномерность толщины для того, чтобы от влияния стенок не было заметного, в пределе погрешности наблюдения, изменения в высоте. 3) Трубки должны выдерживать те давления, которые определяются при помощи наблюдения столбов жидкости, в них находящейся. Это последнее условие особенно важно при наблюдении высоких давлений, ибо предел упругости стекла не достаточно высок, чтобы стеклянные трубки сколько-либо значительных размеров могли выдерживать большие давления.

В этой главе я опишу те приемы, которые были употреблены мною для определения диаметров трубок, равномерности их стенок и сопротивления разрыву. При этом главное внимание будет обращено на трубки довольно значительных диаметров, и только при определении диаметров речь будет итти также о трубках с незначительным диаметром отверстия, то есть о, так называемых, капиллярных трубках, для которых столь часто необходимо производить определения относительных

[1] Опыт показал мне, что точные определения высот ртутных столбов можно делать в широких, точно внутри обточенных железных или стальных трубках, взвешивая ртуть, вмещающуся в них; но применение этого способа для определения давлений я не успел еще выполнить, предполагая заняться этим при изучении сжимаемости газов при высоких давлениях.

емкостей различных их частей, то есть производить, так называемую, калибрацию их.

Изменение диаметров трубок проще всего выражается отношением плоскостей их сечения, перпендикулярных к оси трубки. Зная плоскости сечения, можно уже знать и диаметр, если сечение трубки представляет круг, а потому тогда прямо находится, по известному сечению, диаметр в данном месте трубки. Если же сечение трубки эллиптично, то тогда, кроме определения плоскости сечения, необходимо знать отношение между большою и малою осями эллипсиса. Это последнее узнается только непосредственным измерением этих осей при помощи микрометра. При выборе трубок легко на глаз видеть значительные отступления от цилиндричности внутреннего отверстия трубки, потому что тогда, при внешней цилиндричности трубки, стенки ее будут представлять неодинаковую толщину, а именно будут по малой оси эллипсиса представлять бо́льшую толщину, чем по большой оси; эллиптические трубки нередко и снаружи представляют неодинаковые диаметры. Такие трубки, конечно, должны быть устранены от исследования.

Если трубка предназначается для непродолжительного исследования, например, для определения объема или для определения поднятия жидкости вследствие капиллярности, или если вся ее длина невелика, тогда можно избежать калибрования трубки, сделав разрез ее, по окончании опыта, в том месте, диаметр которого должен быть определен, и подвергая непосредственному измерению микрометром оба полученные отрезка (а при коротких трубках оба конца). Наблюдения этого рода, при значительном увеличении трубы, могут быть производимы прямо при помощи катетометра, снабженного окулярным микрометром, каковы все катетометры, употребленные мною в исследованиях. При таком определении требуется тщательная [1] установка трубки по направлению оптической оси трубы. Такой установки простейшим образом можно достигать, закрепляя испытуемую трубку мягкою мастикою (стр. 73 [=334]) приблизительно в горизонтальном положении и направляя потом на срезанное место трубки катетометрическую трубу так, чтобы оптический центр ее, определяемый перекрещиванием паутин, совпадал с центром круга, представляющего сечение трубки. [2] Когда такая установка сделана и катетометр закреплен, выдвижку окуляра трубы должно изменить так, чтобы фокус трубы был более удален, то-есть чтобы видна была часть внутренности испытуемой трубки. Если ось этой последней поставлена действительно по оптической оси трубы (равно как и трубка, служащая для выдвижки окуляра), то после такой перемены выдвижки, оптическая ось трубы будет оставаться в центре видимого кругового сечения трубки. Если этого нет, то установка испытуемой трубки в мягкой мастике поправляется до тех пор, пока при всевозможных положениях выдвижки оптическая

[1] Установка по уровню нередко достаточна, но во всяком случае менее точна, чем далее описываемая.

[2] Подвижные нити микрометра дают легкую возможность точно убедиться в этом.

ось трубы не будет всегда находиться в центре видимого круга испытуемой трубки. Когда такою установкою убедились, что оптическая ось трубы катетометра и ось испытуемой трубки совпадают, тогда микрометром непосредственно измеряется внутренний диаметр в произведенном разрезе. Затем трубка перевертывается около на 120° около своей оси и производится новое измерение, которое повторяется затем несколько раз при различных положениях трубки. Такие измерения могут доставить, при эллиптичности сечения, материал, достаточный для определения наибольшей и наименьшей осей сечения, что дает возможность расчесть и плоскость сечения. Неоднократно я имел случай убедиться в том, что такое непосредственное измерение, произведенное при увеличении раз в 30-ть, легко дает диаметр с точностью до 0,003 мм., если микрометр дает возможность ясно отчитывать тысячные доли миллиметра и если диаметр не превосходит 5—6 мм., потому что некоторые из трубок этого рода, изученные по весу вмещающейся в них ртути, были потом мною исследованы по окончании опыта вышеописанным способом. Если диаметр трубки превышает 6 мм., то моими микрометрами нельзя уже измерять их при значительном увеличении и тогда должно прибегать к определению шкалою, которое никогда не может дать такой степени точности, какая достигается прямым микрометрическим измерением. Но и при этом точность легко довести до 0,01 и даже до 0,006 миллиметра.

Этот непосредственный способ измерения диаметров, чрезвычайно полезный и наиболее быстрый во многих случаях, становится, однако, неприложимым в большинстве других случаев, когда трубка должна долгое время оставаться в составе прибора и когда необходимо во многих ее местах знать ее диаметр. Это особенно касается до трубок, назначаемых для приготовления барометров, термометров и манометров. В этом случае средством для измерения служит истинное калибрование, то есть определение количества ртути, занимающей определенную высоту в исследуемой трубке. Для выражения сечений трубки в разных ее местах, в этом случае я прямо употребляю числа, получаемые из весов ртути, выраженных в граммах. Представим цилиндрическую трубку, которой радиус $= r$ и выражен в сантиметрах. Сечение ее в квадратных сантиметрах будет πr^2 кв. сантиметров, а емкость столба высотою в 1 сантиметр будет равна πr^2 куб. сантиметров. Следовательно, в этой емкости вместится при некоторой температуре t, когда плотность ртути $= d$, количество ртути, равное $\pi r^2 d$ граммам, взвешенным в безвоздушном пространстве. Следовательно, если нам известен вес ртути, вмещающейся в единице высоты трубки, то этот вес даст тотчас и диаметр трубки. Дабы не делать излишних расчетов, сечение всех трубок я обыкновенно выражал непосредственно в граммах ртути, вмещающейся в цилиндре высотою в 1 сантиметр или 1 мм. Расчет, производимый при калибровании, я сводил всегда на определение сечений трубки, выраженных вышеуказанным образом.

Приемы, употребленные мною для определения сечений широких трубок, состояли в следующем. Исследуемая трубка, открытая с обоих концов, закреплялась в том положении, какое она будет иметь при на-

блюдении (а не в обратном) и устанавливалась по отвесу вертикально; в нижнее ее отверстие замастичивался один конец ⊢ образной трубки, оба других, нисходящий и горизонтальный концы этой ⊢ образной трубки, снабжались кранами. Нижний кран, прикрепленный к нисходящей ветви этой трубки, снабжался притом трубкою с тонким отверстием и служил для выливания ртути. Боковой же кран сообщался, при помощи примастиченной трубки, с резервуаром, содержащим ртуть. Верхний конец испытуемой трубки соединялся с насосом и из него выкачивался воздух трубки. Когда выкачивание было произведено, тогда выпускное отверстие нижнего крана погружалось во ртуть и этот кран отворялся, чрез что ртуть входила в трубку. Если трубка была коротка и требовалось исследовать ее на высоте не более барометрической, то можно было совершенно избежать бокового крана и выкачиванием при помощи насоса наполнять всю трубку ртутью до желаемой высоты. Но если трубка высока и если требовалось несколько раз произвести калибрацию, то боковой кран оказывался чрезвычайно полезным в отношении быстроты манипуляций. В таком случае, когда чрез открытие нижнего крана взошло в трубку некоторое количество ртути, этот нижний кран запирается и отворяется боковой кран, чрез что ртуть из резервуара входит в трубку до желаемой высоты. Тогда сообщение верхнего конца трубки с насосом прекращается (если не требуется определить диаметр трубки в том ее состоянии, когда внутри находится пустота, а снаружи действует атмосферное давление); боковой кран тогда запирается, производится выливание некоторого количества ртути и делается отчет положения ее, причем также определяется и высота мениска, если трубка имеет сколько-либо значительный диаметр. Если на трубке нанесены деления, то отчет положения верхней части мениска относится к этим делениям. Если же на стенке трубки не сделано делений, то катетометром производится определение расстояния между верхнею частью мениска и некоторою определенною, остающеюся на трубке меткою. Затем часть ртути выпускается в тарированный сосуд и он взвешивается, а в трубке производится вновь отчет. Новое выливание и взвешивание ртути продолжается до конца всей трубки. В широких трубках, если требуется точная калибрация, должно выливать очень небольшие столбы ртути и с большою тщательностью определять высоту мениска, потому что диаметры широких трубок нередко весьма быстро меняются и редко меняются правильно; иногда перемены быстры и непоследовательны, [1] а с изменением высот менисков, в широких трубках, при одной и той же высоте вылитых столбов (считая высоты столбов от вершины мениска) и при одном и том же диаметре, получаются не одинаковые количества вылившейся ртути, ибо емкости менисков будут тогда различны. Исследования Данжера (Annales de Chimie et de Physique (3) XXIV) дают возможность по высоте мениска определить емкость той части трубки, которая находится между горизонтальною плоскостью, проходящею чрез верхнюю часть мениска и самою поверхностью мениска, если известен диа-

[1] Это зависит особенно от пузырьков, утолщений и т. п.

метр трубки и высота мениска. Десень подверг расчету данные Данжера и так как расчет оказался согласным с опытом, то я и руководствовался данными этого последнего расчета.

Вот извлечение из таблицы (Annales de Chimie et de Physique (3) LI—437) Десеня.

Диаметр трубки в миллиметрах	Высота мениска в миллиметрах	Высота в мм. цилиндра, имеющего сечение трубки и равного по объему с вогнутою частью мениска $= l$	$\frac{h}{l}$
6	1,196	0,518	2,31
8	1,414	0,587	2,41
10	1,559	0,609	2,56
12	1,607	0,676	2,49
14	1,657	0,609	2,55
16	1,686	0,570	2,96
18	1,703	0,532	3,20
20	1,710	0,496	3,45
22	1,712	0,461	3,71
24	1,710	0,429	3,98
26	1,707	0,400	4,27
30	1,698	0,351	4,84
40	1,679	0,265	6,34
50	1,665	0,212	7,85
60	1,656	0,177	9,35

Из этой таблицы очевидно, что при диаметре около 22 мм. нормальная [1] высота мениска достигает наибольшей своей величины, а при диаметре около 12 мм., высота цилиндра (l), равнообъемного с вогнутою частью мениска (то-есть с тою частью трубки, которая заключается между горизонтальной плоскостью, проходящею чрез вершину мениска, и поверхностью самого мениска) также достигает наибольшего значения. Отношение между высотою этого цилиндра (l) и высотою мениска при этих радиусах трубки меняется между пределами от 1 : 2,49 до 1 : 3,71. Это отношение, приведенное мною в последнем столбце предшествующей таблицы, почти постоянно возрастает с возрастанием диаметра. Для данного диаметра я считал его при своих расчетах постоянным и на основании этого находил те поправки, которые должно было вводить при калибровании. Пусть, например, диаметр трубки около 20 мм. Отношение, примененное здесь для поправок $= 3{,}45$. [2] Определив первое положение верхней точки мениска (пусть счет идет снизу

[1] Высоты менисков ртути (а следовательно и депрессия) при одном и том же диаметре трубки (при той же трубке, ртути, температуре, давлении и пр.) изменяются, но одной высоте отвечает наибольшая прочность. Эту высоту я и называю нормальною.

[2] Для трубок с очень малым диаметром можно отношение это принять за 2, потому что опыты Данжера для трубок с диаметром менее 5 мм. удовлетворяют этому отношению с достаточною степенью точности.

от 0 мм.), например 157,35 мм., я отчитывал высоту мениска, и пусть она = 1,487 мм., тогда высота цилиндра, равнообъемного с вогнутою частью мениска, определится из отношения: 1,487 : x = 3,45 : 1, то-есть искомая высота = 0,430 мм. Отсюда следует, что если бы ртуть кончалась горизонтальною плоскостью, то она была бы ниже вершины мениска на 0,43 мм., следовательно приходилась бы на 157,35 — — 0,43 или на 156,92 миллиметре. Если затем выпускалась ртуть и вершина мениска была при 145,68 мм., а высота мениска 1,075 мм., то соответственная горизонтальная плоскость проходила бы чрез 145,68— —0,31 или чрез 145,37 мм. Поэтому в расчет взойдет данное: между 145,37 и 156,92 или (среднее) при 151,14 мм. сечение трубки равно найденному весу ртути (исправленному на взвешивание в воздухе и температуру), деленному на 156,92 — 145,37, то-есть на 11,55. Если бы не сделать указанной поправки, то делитель был бы 157,35 — 145,68 = = 11,67, а потому вкралась бы погрешность, тем бо́льшая, чем короче выпущенный столб ртути и чем больше диаметр трубки.

Таким образом, зная каждый раз высоты менисков, мы введем чрез то поправку, необходимую для точного определения диаметра трубки. Считаю неизлишним привести при этом пример калибрации одной из трубок, употребленных мною для манометра. В применении, для которого назначалась эта короткая трубка, диаметром около 18 мм., необходимо было с возможною точностью знать сечение трубки в разных местах, близких друг к другу.

До выливания	Положение вершины мениска [1]	5,17	7,18	9,65	11,68	14,05	18,17
	Высота мениска	1,598	1,647	1,630	1,573	1,605	1,595
После выливания	Положение вершины мениска	7,28	9,60	11,60	13,98	18,13	20,03
	Высота мениска	1,387	1,409	1,500	1,375	1,207	1,150

[1] Это положение определялось по отношению к миллиметрическим делениям, на трубке нанесенным; высота мениска, равно как и высота вылитого столба ртути определялись непосредственно микрометром, чтобы иметь большую точность в этих данных. Деления, между концы должно было знать абсолютные величины диаметров, были от 5 до 20 мм. В некоторых определениях (напр. во 2-м) ртуть была вновь прилита, после предшествующего наблюдения, из боковой трубки. После каждого определения трубка встряхивалась, чтобы придать оставшемуся мениску положение, близкое к нормальному, а потому отчет каждого выпуска должно считать совершенно независимым от предшествующего отчета. Несовпадение первого отчета с последним предшествующим отчетом по положению вершины мениска зависит не только от указанных выше обстоятельств, но также от того, что температура массы ртути (помещающейся ниже исследуемой части трубки) в промежуток от одного опыта до другого менялась, и еще от того, что отчет положения вершины мениска по грубости делений трубки не может быть считаем более точным, как до $^1/_{10}$ миллиметра.

Высота вылитого столба в мм. по прямому микрометрическому измерению:	2,093	2,463	1,989	2,306	4,109	1,858
Исправленная высота вылитого столба ртути: [1]	2,049	2,388	1,949	2,244	3,985	1,719
Исправленный (на тару, разновес и взвешивание в воздухе) вес вылитой ртути, граммы:	6,8603	7,9995	6,5680	7,5892	13,4630	5,7742
Сечение в ртутных единицах (граммы на мм.) или частное из веса на высоту столба:	3,348	3,350	3,370	3,382	3,378	3,359
Деление трубки, коему это сечение соответствует	6,2	8,4	10,6	12,8	16,1	19,1

Подобно тому, как в этой трубке, так и в других широких трубках есть возможность выпускать и взвешивать столь малые столбы ртути, что, по незначительности их высоты, можно было принять в этой высоте изменение диаметра равномерным, то-есть считать столбы небольшой высоты за цилиндр или за конус и находимое по весу ртути сечение относить к среднему положению между двумя отчетами, определяющими две крайних точки цилиндра выпущенной ртути. Таким образом, по данным выше приведенным, составляется таблица сечения в разных местах трубки. Для определения по этим данным сечений трубки в квадратных сантиметрах, нужно только полученные числа разделить на плотность ртути при температуре наблюдения. Она в вышеуказанном наблюдении изменялась в течение опыта от 17,4 до 17,6 и потому можно принять среднюю температуру 17,5 за нормальную; но при этой температуре, судя по стр. 59 [= 318], логарифм плотности ртути = 1,1320423, а потому сечения, выраженные в квадратных сантиметрах, суть:

Деление трубки	6,2	8,4	10,6	12,8	16,1	19,1
Сечение в кв. сант.	2,4704	2,4716	2,4864	2,4954	2,4927	2,4784

Так как при пользовании этою трубкою необходимо было упростить расчет, то была составлена следующая таблица ее калибрации, выраженная в квадратных сантиметрах сечения:

Деление трубки	6	8	10	12	14	16	18
Сечение в кв. сант.	2,470	2,471	2,482	2,493	2,496	2,493	2,485

[1] При этом исправлении принято отношение $\frac{h}{l} = 3{,}20$, и по разделении на него наблюденных высот менисков частное для нижнего мениска прикладывается к длине столба выпущенной ртути, а частное, относящееся к верхнему мениску, вычитается из этой длины, как следует по существу дела.

Если затем для этой трубки потребуется узнать емкость ее между некоторыми делениями, то и ее легко определить, зная сечения, отвечающие различным высотам трубки, а именно: например между 6 и 14 делениями емкость всей трубки найдется по правилу Симпсона, заметив, что промежуток в нашей таблице сечений равен 0.2 сантиметра:

$$\frac{0,2}{3}[2,470 + 4 \cdot 2,471 + 2 \cdot 2,482 + 4 \cdot 2,493 + 2,496] =$$

$$= 1,9858 \text{ куб. сант.}$$

§ 64

Что касается до калибрования капиллярных трубок, снабженных делениями или метками, то, смотря по диаметру их, оно производится или в горизонтальном, или в вертикальном их положении. Если диаметр трубки превышает 1,5 мм., то тогда калибрация трубки в горизонтальном положении сопряжена с погрешностями, потому что капля ртути, служащая для калибрации, ограничена несимметрическими поверхностями менисков, а мениски имеют форму, заметно изменившуюся от влияния тяжести. В таком случае, то-есть при сколько-либо широких капиллярных трубках, калибрация производилась точно так же, как выше описано для широких трубок, и только для трубок, имеющих диаметр менее 1,5 мм., калибрация производилась в горизонтальном положении при помощи ртутных капель. Такой способ калибрации капиллярных трубок, как известно, имеет весьма обширную литературу. Многие из физиков занимались вопросами, касающимися до калибрации тонких трубок, в особенности в применении к термометрам. Свод и рассмотрение методов, употреблявшихся до сих пор для этой цели, можно найти в диссертации Эттингена. [1] Способ, примененный мною при изучении капиллярных трубок, назначавшихся для наблюдения над капиллярностью жидкостей, описан вкратце в отчете об этом предмете (Химический журнал Соколова и Энгельгардта и Горный Журнал за 1859 и 1860 гг.). Такой же способ я употребляю и по настоящее время. Так как в последнее время я имел случай убедиться в том, что при помощи приборов, какими я ныне обладаю, мои приемы доставляют такую степень точности, какой едва ли можно достичь при других мне известных способах, то я и считаю неизлишним описать здесь не только приемы, употребленные мною для наблюдений, но и способ расчета полученных результатов. В этом последнем отношении важнее всего заметить, что применяемый мною способ расчета отличается от обыкновенно употребляемых способов преимущественно на основании того, что в своих расчетах я свожу дело на определение сечений трубки в данном месте, что содействует простоте расчета, по-

[1] Über die Korrektion der Thermometer insbesondere über Bessel's Kalibrir-Methode von Arthur von Oettingen. Dorpat. 1865.

стоянной очевидности его результатов и легкости извлечения из результатов наблюдения необходимых данных для калибрации. [1]

Для калибрирования тонких капиллярных трубок при помощи передвижения капли, я употребляю делительную машину Саллерона, винт которой снабжен отчетным кругом, дающим легкую возможность отсчитывать сотые доли миллиметра. Числом оборотов этого винта и их долей я определяю только положение капли, да и то только в том случае, когда на трубке нет нанесенных делений, по отношению к которым тогда проще всего и определяется положение капли. Деления эти могут быть верны или неверны — это не окажет влияния на результат расчета, потому что самое определение переменной длины капли производится помимо показаний делительной машины и делений, нанесенных на трубке, а именно при помощи двух микроскопов, которые укреплены на подвижной части делительной машины. Один из этих микроскопов имеет только одну неподвижную нить, а другой снабжен сверх того окулярным микрометром с подвижною нитью (работы г. Брауэра), и деления этого окулярного микрометра служат для выражения изменений длины капли.

Предварительно на особом масштабе определяется расстояние неподвижных нитей обоих микроскопов, поместив масштаб в том же фокусном расстоянии, какое будут иметь капли. Затем определяется на этом же масштабе число оборотов и долей оборота микрометренного винта, отвечающих 1-му мм., а затем уже приступается к калибрированию. Если берется длинная капля, то передвижением тележки делительной машины первый из микроскопов, не снабженный микрометром, наводится на один конец капли, так чтобы неподвижная нить его проектировалась на конце капли; когда это достигнуто, подвижные нити микрометра другого микроскопа устанавливаются на другом конце капли и делается отчет длины капли по положению микрометра, то-есть по расстоянию его подвижной нити от неподвижной нити микрометра (выраженный в числе и долях оборота микрометра). В другом положении капли опять первый микроскоп наводится на один конец капли, а подвижная нить другого микроскопа устанавливается на другой конец капли. Разность длины капли таким образом выражается в оборотах и их долях окулярного микрометра одного из микроскопов. Поэтому необходимо знать в абсолютных величинах расстояние оптических осей микрометров и значение одного оборота микрометра. Эти последние определения легко достигаются также при помощи делительной машины, наведя первоначально один из микроскопов на некоторую метку трубки и передвигая потом подвижную часть делительной машины до тех пор, пока в другой микроскоп на нити будет видна та же самая метка. Произведя при этом отчет на делительной машине, узнаем в ее делениях расстояние неподвижных нитей обоих

[1] В остальных способах калибрации расчету подвергаются длины капель и это составляет главную причину неясности и сбивчивости извлечения результата из наблюдений. Те действия (суммирования), которые вполне законно применяются к сечениям (или емкостям столбов трубки, имеющих высоту = 1), не могут быть применены к длинам капель без новых гипотез.

микроскопов, то-есть первоначальную длину капли в первом ее положении, когда неподвижные нити обоих микроскопов установлены на ее концы. Затем микроскоп, снабженный микрометром, наводится неподвижною нитью на некоторую метку трубки, и этот микроскоп передвигается при помощи винта делительной машины на определенное расстояние, например, на 1 мм. Тогда, действуя окулярным микрометром, должно довести подвижную нить до избранной метки на трубке, и чрез это определяется отношение между делениями окулярного микрометра и долями оборотов делительной машины, следовательно, узнается отношение между расстоянием неподвижных нитей обоих микрометров и одним оборотом микрометра. Если исследуемая трубка снабжена, как это чаще всего бывает, нанесенными на ней делениями, то легко перевести наблюденные расстояния в те единицы, которые избраны для разделения трубки на части, равные по длине. В этом последнем отношении чрезвычайно важно, для легкости калибрации, иметь прямо трубку с делениями взаимно-одинаковыми, в пределах точности отчета окулярного микрометра. Большинство тех капиллярных трубок, которые в последнее время подвергались мною исследованию, были разделены для меня г. Брауэром, а его деления представляли такую степень точности, что, в пределах неизбежных погрешностей отчитывания, производимого при калибрации, деления можно было считать за равнорасстоящие друг от друга, что значительно облегчало всю дальнейшую работу. Если же этого нет, то-есть, если деления нанесены грубой делительной машиной, не снабженной поправками, то необходимо, прежде чем приступить к калибрации диаметров трубки, определить расстояния между нанесенными на трубку делениями и выразить их в некоторой единице. Эта предварительная работа представляет случай, совершенно сходный с компарацией, о способах которой я буду говорить впоследствии в особой главе, а потому здесь буду предполагать, что на трубку нанесены уже деления, равноотстоящие друг от друга.

Прежде описания способов наблюдения, необходимо заметить, что хорошую калибрацию можно произвести только с трубками, не представляющими заметной кривизны оси. Сверх того, деления, наносимые на трубку, должны быть сколь возможно тонкие, так как при толстых делениях, в особенности при делениях, вытравленных плавиковою кислотою, нет возможности производить точного отчета микроскопом, потому что толщина делений и неровность видимых в микроскоп краев их не позволяют тщательно установить ни неподвижной, ни подвижной нитей по отношению к делениям. При толстых делениях погрешность калибрации будет зависеть от толщины делений. Установку нитей микроскопов на концы менисков можно произвести весьма легко даже при слабом увеличении (раз в 30 или 40) с точностью до 0,005 мм., а такую же установку на толстые деления, какими обыкновенно снабжаются трубки термометров, нет возможности произвести с точностью, большею как до 0,05 мм. По этой причине трубки с толстыми делениями не могут подлежать тщательной калибрации. Они не могут дать впоследствии при наблюдениях правильного отчета,

потому что часть толстого деления может закрывать видимый мениск жидкости, а потому будет препятствовать отчету положения жидкости в трубке во многих ее местах, закрытых толстыми делениями. Поэтому надобно наносить на трубках, подвергаемых тщательной калибрации, сколь возможно тонкие, равномерные и короткие деления, а такие деления достигаются только при помощи тщательно избранного алмаза, способного не царапать и резать, а только проводить равномерную черту на стеклянной трубке. Выбор такого алмаза весьма затруднителен; но многие из трубок, деленных для меня Брауэром, представляют в этом отношении деления, столь тонкие и правильно ограниченные, что при увеличении в 30—40 раз они представляются столь же чистыми на стекле, какими представляются тщательно сделанные деления на металле острым и правильно устроенным резцом.

Трубка, назначаемая для калибрации, укрепляется мягкою мастикою на верхней части параллельной деревянной пластинки, представляющей откос такого рода, чтобы он служил для отражения света по направлению осей микроскопов. Поэтому плоскость среза пластинки должна быть наклонна приблизительно под углом в 45° к горизонту. Над этою наклонною поверхностью, отражающею свет, закрепляется трубка так, чтобы ось ее была параллельна верхнему боку пластинки. Эта параллельность необходима потому, что тогда установка трубки чрезвычайно облегчается. Самая делительная машина устанавливается горизонтально. Это последнее узнается при помощи микроскопа следующим образом. Перед делительною машиною, параллельно с нею, кладется металлическая линейка с делениями. Она устанавливается при помощи уровня вполне горизонтально. Подвижная часть делительной машины с микрометром переводится на один конец винта, и микроскоп устанавливается на деления этой линейки. Затем подвижная часть делительной машины с микроскопом передвигается вдоль винта и микроскоп тогда движется вдоль по линейке. Если делительная машина установлена горизонтально, то во все время передвижения микроскопа деления линейки будут видимы столь же явственно, как и при первоначальной установке микроскопа. Если же деления будут не явственно видимы, то непосредственным измерением можно узнать, которая часть рельсов делительной машины выше, и соответственными винтами можно регулировать ее положение до того, чтобы движение на делительной машине подвижной части происходило в горизонтальной плоскости. Когда это достигнуто, тогда на линейку с делениями, установленную горизонтально, помещается вышеописанная деревянная пластинка с параллельными гранями и с прикрепленною к ней капиллярною трубкою. Очевидно, что тогда и ось капиллярной трубки будет находиться в горизонтальном положении. Тогда микроскопы устанавливаются так, чтобы видны были с ясностью как деления, нанесенные на трубке, так и концы ртутной капли. Это достигается только тогда, когда деления находятся в одной горизонтальной плоскости с осью трубки, а не выше или ниже ее. В последнем случае что либо одно будет неясно видно: или концы капли, или деления.

По обоим концам изучаемой капиллярной трубки на каучуке или мастикою предварительно закрепляются два крана, прикрепленные затем к вышеупомянутой деревянной пластинке. Свободные концы этих кранов входят в две трубки для хлористого кальция, которые кончаются затем каучуковыми трубками такой длины, которая превышает длину делительной машины. Эти каучуковые трубки дают возможность передвигать каплю без перемены положения прибора, при помощи вдувания или вытягивания воздуха. При малом навыке легко достичь втягиванием воздуха при открытых кранах перемещения капли в капиллярной трубке по направлению движения воздуха. Если при этом капля передвинулась несколько более надлежащего, то втягиванием воздуха с противоположного конца легко достичь того, чтобы капля заняла определенное желаемое положение. Такую установку легко производить с точностью до 0,1-й доли миллиметра. Трубки с хлористым кальцием служат при этом для того, чтобы при втягивании воздуха не могли попадать в трубку пары или пыль; а краны по концам трубки служат для того, чтобы придать капле неподвижность. Если трубка несколько конична, что обыкновенно и бывает, то вследствие различия капиллярного давления поверхностей ртути по обоим концам капли, она стремится двигаться по направлению к большему диаметру, а потому в открытой трубке капля нередко перемещается сама собою. Это особенно часто бывает, если предварительно не произведено надлежащей горизонтальной установки и если последняя представляет кривизну. Но даже и при прямой трубке и горизонтальной установке, при открытых концах ее, капля нередко в течение наблюдения несколько меняет свое положение. Этого никогда не бывает, если трубка снабжена по концам кранами, потому что такое передвижение влечет за собою в этом случае перемену в упругости воздуха, заключенного по обоим концам трубки; а потому, после установки капли на надлежащем месте, оба крана по концам трубки запираются, и тогда капля делается неподвижною, в особенности если после запирания кранов сообщить деревянной пластинке слабый удар, заставляющий принять каплю естественнейшее положение в покое.

Если необходимо по роду определений взвесить каплю, проводимую чрез трубку, то, отделив один из кранов и вдувая чрез другой конец воздух, прошедший чрез хлористый кальций, можно вытеснить каплю вполне в подставленное часовое стекло и тогда взвесить. Если на одном из концов капиллярной трубки выдут шарик, то при его помощи легко достигается введение в трубку капли желаемой длины; тогда все манипуляции, необходимые для калибрования трубки, а именно, замена капли одной длины каплею другой длины, могут быть производимы без какой-либо перестановки прибора. При этом только потребуется несколько раз снять трубку вместе с деревянною пластинкою и один из ее концов наклонить, а потом позаботиться о том, чтобы трубка легла параллельно оси движения микроскопов. Для того, чтобы при таком перемещении трубки не делать вновь установки на металлической линейке, составляющей опору для деревянной пластинки, приклеиваются куски пробки, определяющие положение деревян-

ной пластинки, а следовательно и трубки, по отношению к микроскопам; так что деревянную пластинку с трубкою и краном можно сколько угодно раз брать и перемещать вдоль по оси и, после новой установки, трубка каждый раз будет помещаться во всех своих положениях в фокусе микроскопов. Если это достигнуто, все манипуляции калибрования весьма значительно упрощаются. При некотором навыке для такой установки требуется не более часа времени, а для всей калибрации трубки, по способу нижеописанному, обыкновенно не более одного дня работы.

§ 65

Для начала калибрования трубки, в нее вводится сколь возможно малая капля. Длина ее зависит от степени точности измерительных приборов. Если микрометром несомненно скоро и легко отчитываются сотые доли миллиметра (увеличение в 20—30 раз для этого достаточно, а при этом отчет чрезвычайно ясен) и если капля будет представлять длину в 10 мм., то в длине капли точность отчета будет составлять 0,001. Если же капля будет представлять длину в 50 мм., то точность отчета будет еще большею, а именно в 5 раз. Но тогда небольшие и быстрые изменения в диаметре трубки могут быть упущены и скрыты при большой длине капли; а потому при длине капли в 50 мм., хотя и выигрывается в относительной точности в 5 раз, но проигрыш будет в том, что при большой длине капли нужно будет, как увидим далее, произвести большее число операций для достижения того же самого результата. Конечно, если трубка предварительно избрана из довольно правильных, можно сразу брать каплю значительной длины. Если же трубка представляет значительные неправильности или желательно произвести калибрацию с возможным совершенством, то необходимо для начала брать каплю, на сколько возможно короткую. Для термометрических трубок я обыкновенно брал в начале каплю длиною в 10—15 мм. Столь короткую каплю, при значительном фокусном расстоянии микроскопа и при незначительном увеличении, можно мерять непосредственно в поле зрения одного микроскопа, снабженного микрометром, то-есть всю длину ее измерить оборотами винта окулярного микрометра, с точностью до $^1/_{2000}$ доли длины капли.

После каждого перемещения капли определяется, во 1-х, ее длина, и во 2-х, ее положение. Длина ее определяется или расстоянием неподвижных нитей обоих микроскопов, если отчет производится двумя микроскопами, и числом оборотов микрометра, или же по числу оборотов микрометра, если капля видима в поле зрения одного микроскопа. Положение капли определяется тем, что один и всегда в одном направлении находящийся конец капли отчитывается по делениям трубки, которым он отвечает. Если при этом в последнем отчитывании и будет сделана некоторая погрешность, то она не будет иметь значительного влияния на результат калибрации, потому что, при небольшой перемене в положении капли, длина ее изменяется ничтожно мало. Поэтому, определение длины необходимо производить сколь возможно

тщательнее, тогда как определение положения может быть сделано с меньшею степенью точности. Лучше всего, если определение положения производится каждый раз тем микроскопом, который снабжен микрометром, и при помощи его определяется расстояние между концом капли и ближайшим делением трубки. Таким образом составляется первое данное для калибрации, то-есть отношение между длинами короткой капли и ее положениями. Эти определения длины дают сечения трубки в тех местах, которые отвечают средине капли, если трубка будет цилиндрична или если сечения ее изменяются по линейному уравнению. Задача, которую предлежит решить, состоит в том, чтобы узнать, по сделанным наблюдениям, изменение сечения в разных местах трубки.

Для ясности дальнейшего изложения необходимо рассмотреть простейшие случаи, могущие представиться при изучении переменных сечений трубок короткими каплями. Если допустить, что на протяжении такой капли плоскость сечения остается постоянною (трубка цилиндрична), или изменяется по линейному уравнению, то плоскости сечений в местах, отвечающих средине капли, очевидно, будут обратно пропорциональны наблюденным длинам одной и той же капли. Такое допущение, однако, не может удовлетворять точному калиброванию большей части трубок, потому что: 1) Очень короткие капли нельзя точно мерять: относительная погрешность измерения длины будет очень велика, а только при таких каплях и можно, в пределе точности отчетов, допустить равномерность изменения плоскостей сечения трубки на всю длину капли. 2) При таком допущении получатся тем бо́льшие уклонения от истины, чем чаще совершаются хотя бы и малые перемены в сечениях трубки, а именно чем чаще переходит трубка от съуживания к расширению и обратно, а чем равномернее, при прочих равных условиях (диаметре, качестве стекла, толщине стен и пр.), сечения трубки, то-есть, чем ближе трубка к цилиндру, тем чаще встречаются в ней места с такими переменами сечений, как показал мне опыт измерения многих трубок, произведенный мною при изучении сцепления разных жидкостей. Такие именно (то-есть по первому грубому калиброванию наиболее близкие к цилиндру) трубки чаще всего избираются для устройства термометров и вообще для калибрации, ибо часто предполагают, что в них все изменения сечений мало значительны. Опыт показывает напротив того, что наибольшею равномерностью, отсутствием перегибов и перехватов чаще всего отличаются трубки наиболее конические, то-есть такие, в коих сечения быстро меняются по длине, и по моему мнению эти последние наиболее пригодны для точной калибрации. Если же в трубке встречаются раздутия или перехваты, хотя бы очень малые то-есть по длине капли переходы от прибыли в величине плоскости сечения к убыли и обратно, то тогда допущение коничности или цилиндричности трубки непременно влечет за собою погрешность результата, легко поправимую при допущении дальнейшего приближения к истине.

Оно состоит в предположении, что на том пространстве, где наблюдаются три длины капли l_1, l_2 и l_3 при положениях средин x_1, x_2 и x_3,

то-есть на протяжении трубки

$$\text{от } x_1 - \frac{l_1}{2} \quad \text{до} \quad x_3 + \frac{l_3}{2},$$

зависимость изменения сечений трубки S_i от изменения места трубки x выражается параболическим уравнением

$$S_i = a + bx_i + cx_i^2. \qquad \text{I}$$

Допуская цилиндричность трубки на всей длине капли, принимают постоянные коэффициенты b и c равными 0; принимая совершенную коничность трубки, признают $b = 2\sqrt{ac}$[1], допуская, что сечения следуют линейной зависимости от их положений на оси трубки, признают $c = 0$, а эти предположения и лежат в основании способов калибрования Гей-Люссака, Реньо, Коппа, Галльштрема и др. и потому, приняв уравнение I, мы можем достичь дальнейшего приближения, чем при допущениях, нередко до сих пор применявшихся.

Приняв гипотезу, выраженную I уравнением, уже легко по длинам судить о сечениях, а узнав изменение сечений в разных местах трубки, мы узнаем объемы трубки между любыми x_i и x_n, а потому можем проверить и исправить полученные данные для сечений, взяв каплю другой, большей длины. Подробности такого способа изучения капиллярных трубок я объясняю далее сперва в общих основаниях, а потом в кратком примере.

§ 66

Результат непосредственного измерения длин l короткой капли при разных ее положениях выразится (в одних и тех же единицах, например в миллиметрах) следующим образом:

$$x_0 \quad x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \ldots x_n$$

Тогда наблюдаются длины капли:

$$l_0 \quad l_1 \quad l_2 \quad l_3 \quad l_4 \ldots l_n$$

Требуется в соответственных местах трубки (x_n) найти сечения, если примем, условно, что при некотором x_i длина капли $= l_i$, а сечение по всей длине капли равно s_i, а именно требуется определить:

$$s_0 \quad s_1 \quad s_2 \quad s_3 \quad s_4 \ldots s_n$$

Допустив сперва, что сечения обратно пропорциональны длинам, мы найдем приближенную величину сечения y_n

$$y_n : s_i = l_i : l_n$$

---

[1] Пусть дан конус. Для него очевидно переменный радиус $r = a_1 + b_1 x$, следовательно, плоскости сечений суть $S = \pi(a_1^2 + 2a_1 b_1 x + b_1^2 x^2)$, следовательно, коэффициент при x относится к коэффициенту при $x^2 = 2b_1 a_1 : b^2$, а потому коэффициент при x равняется удвоенному корню из коэффициента при x^2 и из постоянного члена $= 2\sqrt{a_1^2 b_1}$, то-есть в I должно принять $b = 2\sqrt{ac}$.

откуда, так как $l_i s_i =$ объему капли V:

$$y_n = \frac{s_i l_i}{l_n} = \frac{V}{l_n}. \qquad \text{II}$$

А потому для всех мест наблюдения получим приближенные сечения:

$$y_0 \quad y_1 \quad y_2 \quad y_3 \quad y_4 \ldots y_n$$

Величины эти y будут отличаться от истинных сечений s; назовем эту разность чрез z, а потому задача сводится на определение величин поправок

$$z_0 \quad z_1 \quad z_2 \quad z_3 \quad z_4 \ldots z_n$$

Сумма $y + z = s$, а потому, найдя z, найдем s, ибо y получается прямо из наблюдений и условия. Для нахождения величины z и служит гипотеза, выраженная I уравнением. Пусть, например, требуется найти z_2. Для этого надо воспользоваться данными не только для x_2, но и для x_1 и x_3, то-есть при них должно знать l_1, l_2 и l_3. По I

$$\text{от } x_1 - \frac{l_1}{2}, \text{ до } x_3 + \frac{l_3}{2}$$

справедливо уравнение

$$s = a + bx + cx^2, \qquad \text{III}$$

где коэффициенты a, b и c нам неизвестны. Известно же нам только то, что один и тот же объем V капли от $x - \frac{l}{2}$ до $x + \frac{l}{2}$ в разных местах трубки измеряется различными длинами. Этот объем, очевидно, равен определенному интегралу от сечений:

$$V = \int_{x-\frac{l}{2}}^{x+\frac{l}{2}} (a + bx + cx^2)\,dx$$

Произведя интегрирование, получаем:

$$V = l\left(a + bx + cx^2 + \frac{c}{12} l^2\right). \qquad \text{IV}$$

Отсюда, полагая по II условное произведение $s_i l_i = V$ [1] и подставя s по III вместо его значения, имеем:

$$\frac{V}{l} = y = a + bx + cx^2 + \frac{c}{12} l^2 = s + \frac{c}{12} l^2. \qquad \text{V}$$

$$s = y - \frac{c}{12} l^2$$

[1] s_i и l_i суть величины условные, а потому представив в некотором условном месте сечения во всю длину капли постоянным s_i, получим объем капли $V = s_i l_i$.

А так как $s = y + z$, то очевидно, что

$$z = -\frac{c}{12} l^2 \qquad \text{VI}$$

Следовательно, в нашем частном случае для отыскания s_2, то-есть сечения при x_2 требуется к приближенно найденному сечению y_2 прибавить произведение из l_2^2 на $-\frac{c}{12}$, а потому остается неизвестным только величина c в III уравнении. Для ее отыскания и служит гипотеза вышепринятая, по которой от $x_1 - \frac{l_1}{2}$ до $x_3 + \frac{l_1}{2}$ уравнение III справедливо, следовательно для мест x_1, x_2 и x_3 справедливо уравнение V, потому имеем:

$$y_1 = a + bx_1 + cx_1^2 + \frac{c}{12} l_1^2$$

$$y_2 = a + bx_2 + cx_2^2 + \frac{c}{12} l_2^2$$

$$y_3 = a + bx_3 + cx_3^2 + \frac{c}{12} l_3^2$$

Здесь три неизвестных (a, b, c), а потому находим:

$$c = \frac{\dfrac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2} - \dfrac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}}{x_3 - x_1 + \dfrac{1}{12}\left(\dfrac{l_3^2 - l_2^2}{x_3 - x_2} - \dfrac{l_2^2 - l_1^2}{x_2 - x_1}\right)}$$

Так как второй член знаменателя мал сравнительно с первым и так как вся величина c незначительна, то, принимая во внимание возможные погрешности наблюдений, можно с достаточною степенью точности во всех случаях практики принять

$$c = \frac{\dfrac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2} - \dfrac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}}{x_3 - x_1}. \qquad \text{VII}$$

Найдя c, определим по VI $z_2 = -\frac{c}{12} l_2^2$, а таким образом найдем и

$$s_2 = y_2 + z_2 = \frac{V}{l_2} - \frac{c}{12} l_2^2. \qquad \text{VIII}$$

Точно так найдем и всякое другое z_n и s_n.

Для удобства расчета лучше всего поступить так: соответственно наблюденным x и l должно найти сперва y, потом разности соседних y ($y_2 - y_1$, $y_3 - y_2$ и т. д.) разделить на разности тех же соседних ($x_2 - x_1$, $x_3 - x_2$ и т. д.) x, полученные частные (которые близки к коэффициенту b в III) также последовательно вычесть друг из друга

и разности разделить на разность x чрез один ($x_3 - x_1$, $x_4 - x_2$ и т. д.). Полученные частные дадут соответственные c, которые будут изменяться от одного x до другого не только вследствие действительной кривизны трубки, но и вследствие неточностей в определении x и l. Таким образом получится таблица выводов из наблюдения такого вида:

Положения	Длины	Соответственные приближенные значения	Значения первых разностей	Значения вторых разностей	Плоскости сечений
x_n	l_n	$y_n = \frac{V}{l_n}$	$\frac{y_n - y_{n-1}}{x_n - x_{n-1}} = b_n$	$\frac{b_{n+1} - b_n}{x_{n+1} - x_{n-1}} = c_n$	$y_n - \frac{c_n}{12} l_n^2 = S_n$
x_0	l_0	y_0			
			$\frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} = b_1$		
x_1	l_1	y_1		$\frac{b_2 - b_1}{x_2 - x_0} = c_1$	$s_1 = y_1 - \frac{c_1}{12} l_1^2$
			$\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = b_2$		
x_2	l_2	y_2		$\frac{b_3 - b_2}{x_3 - x_1} = c_2$	$s_2 = y_2 - \frac{c_2}{12} l_2^2$
			$\frac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2} = b_3$		
x_3	l_3	y_3		$\frac{b_4 - b_3}{x_4 - x_2} = c_3$	$s_3 = y_3 - \frac{c_3}{12} l_3^2$
			$\frac{y_4 - y_3}{x_4 - x_3} = b_4$		
x_4	l_4	y_4		$\frac{b_5 - b_4}{x_5 - x_3} = c_4$	$s_4 = y_4 - \frac{c_4}{12} l_4^2$
			$\frac{y_5 - y_4}{x_5 - x_4} = b_5$		
x_5	l_5	y_5			

Расчет этот производится весьма легко и еще более упрощается в том случае, когда средина капли перемещается каждый раз на определенную величину, в которой выражены и длины капель. Так, если на трубке нанесены миллиметры, то перестановка короткой (например, в 15 мм.) капли может производиться на 1 сантиметр. Тогда все $x_n - x_{n-1} = 10$, все $x_{n+1} - x_n = 20$ и т. д.

Для облегчения дальнейших расчетов произвольная постоянная величина V должна быть избрана так, чтобы среднее значение сечений было выражено соответственно требованию калибрования. Так, например, если желательно иметь истинные абсолютные площади сечений, выраженные в кв. миллиметрах, то должно поступать следующим образом. Прямое, хотя и приближенное измерение диаметра трубки близ одного конца ее, дает при этом конце ее сечение. Примем его за сечение x_1, а так как приближенное сечение $y_1 = \frac{V}{l_1}$, то $V = l_1 y_1$,

где y примем за то, которое найдено измерением диаметра. Тогда найдем все сечения s_1, s_2, ... s_n, а затем определим вес ртути, вмещающийся в большой капле между некоторыми удаленными x_n и x_m. По этому весу разочтем истинную емкость трубки между x_m и x_n. Назовем его чрез V_m^n. Теперь, по найденным условным сечениям s_1, s_2 ... s_n, суммируя (как описано далее) их между пределами x_n и x_m, найдем (интеграл) объем трубки в пределе от x_n до x_m, выраженный в том условии, что сечение при x_1 = некоторому постоянному y_1. Пусть объем, найденный этим путем, будет V_m^n. Частное $\frac{V_m^n}{S_n}$ примем $= 1 + a$, где $a = \frac{V - S}{S}$. Оно покажет отношение между истинным и принятым нами условным объемом, и потому и отношение истинных сечений [1] к условным, следовательно истинные сечения будут = условным, помноженным на $1 + a$, а потому для нахождения их должно к вышенайденным s_1, s_2, s_n — придать as_n. Если вовсе не требуется знать истинных сечений и емкостей трубки, то V можно взять любое, удобное для счета или в некотором месте x_n при некоторой длине капли l_n принять сечение = 1. Тогда в этом месте $1 = \frac{V}{l_n}$, следовательно $V = l_n$.

§ 67

Сечения s_0, s_1, s_2 ..... s_n, найденные по наблюдениям с одною каплею, должны быть проверены измерениями при помощи капель другой длины, если в изучаемой трубке встретятся значительные и скорые изменения в сечениях. Уравнение VIII показывает, что первое приближение $\frac{V}{l_n} = y_n$ тем ближе к действительности, чем: 1) меньше абсолютная длина капли l_n и чем меньше коэффициент c_n, то есть, чем менее в трубке раздутий и суживаний, то-есть чем ближе подходит трубка в пределе трех соседних капель к цилиндру или такому конусу, коего сечения выражаются линейным уравнением $s = a + bx$. Следовательно, если по таблице, составляющей результат наблюдений, окажется, что в некотором месте c_n изменяются значительно и вне пределов погрешности наблюдения, [2] то в этом месте должно предпола-

[1] Ибо сечение (в квадратных единицах) равно объему (куб. единицы) при единице длины.

[2] О погрешностях в c можно судить по погрешности в l. Назовем абсолютную возможную, наибольшую погрешность в этой величине чрез d (например, d можно принять при измерении проверенным микрометром при увеличении в 20 раз равным 0,02 мм.). Очевидно в y можно ждать погрешности Vd, в b погрешности $= 2d\frac{V}{a}$, где чрез a означено перемещение ($= x_2 - x_1$) капли в опытах, а в c можно ждать погрешности около $d\frac{V}{a^2}$. Так, если принять $d = 0{,}02$, если $V = 1000$, $a = 10$ (миллиметрам) то в c возможна погрешность ± 0.2. Конечно, в действительности погрешность будет гораздо меньше этой, ибо при расчете допущено, что во всех 6-ти данных (3 раза x и l), служащих для определения c, делается наибольшая возможная

гать значительные неправильности в изменении сечения трубки,[1] а потому в этом месте должно произвести новый ряд наблюдений, взяв более короткую каплю, и перемещать ее на меньшие, чем прежде, расстояния по длине трубки. Для того, чтобы выразить результат опытов в прежних единицах сечений, должно поместить сперва взятую каплю в том месте трубки, где сечения, судя по таблице, изменяются наиболее правильно, и где, следовательно, должно предположить точное измерение при большой первоначально взятой капле. Пусть, например, в таком месте x_n сечение $= s_n$. Поместим взятую короткую каплю так, чтобы средина ее была при x_n, и пусть ее длина будет l_n. Очевидно, что $s_n = \frac{V_1}{l_n}$, где V_1 означает условную величину, которую должно взять при расчете данных, полученных с этою новою каплею, чтобы получить сечения в тех же единицах, какие были приняты при первой капле. Пройдя такою короткою каплею те места трубки, где замечены были при первой калибрации неправильности, получим сечения в этих местах и чаще, и точнее.

Даже для весьма значительно-неправильных капиллярных трубок, если только в них нет пузырей, крупинок, сору, нечистот и т. п. весьма грубых несовершенств, вся возможная точность достигается, проведя чрез трубку две малые капли, притом, когда первая взятая капля будет иметь длину в 1000, а вторая в 300 или около того раз бóльшую, чем совершенно ясно отчитываемая часть длины. Так, если микрометр дает тысячные доли миллиметра и сотые читаются с полною очевидностью, то достаточно взять первую каплю длиною в 15, а вторую в 5 мм. Очевидно, что, увеличивая абсолютную точность и в то же время уменьшая длину капель и ее перемещения, можно достичь еще бóльшей точности, но для этого требуются и более совершенные приборы, которые потребуют и новых усложнений приемов. Для термометров и тому подобных приборов, где способ наблюдений не позволяет обыкновенно ручаться более как за $^1/_{10}$ мм., вышеприведенная степень точности оказывается достаточною.[2]

Таким образом, в результате измерений, произведенных с одною или несколькими малыми каплями, получается для мест трубки, отвечающих ее делениям или расстояниям от некоторой метки, а именно для

$$x_0 \quad x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \ldots x_n$$

значения сечений в абсолютных или условных единицах, а именно

$$s_0 \quad s_1 \quad s_2 \quad s_3 \quad s_4 \ldots s_n$$

погрешность отчета и что все эти погрешности влияют в одну сторону, чего, конечно, не будет. Повторение одного и того же ряда определений дает более точные понятия о погрешностях в s.

[1] Или погрешности наблюдений.

[2] В главе о термометрах я буду иметь случай вернуться к определению того влияния, какое оказывает точность калибрования на определение температур.

Для удобства дальнейшей работы и особенно для дальнейшего применения изучаемой трубки необходимо по этим данным составить таблицу калибрований, в которой означены чрез известные промежутки n (например, чрез 10 мм.) сечения. Для нахождения их я применяю комбинацию двух способов: графического и алгебраического. Первый не требует дальнейшего объяснения, потому что производится на бумаге, снабженной делениями, и требует только выбора соответственного масштаба. По оси абсцисс откладываются величины x, а ординаты суть сечения. [1] Получается кривая, по которой и определяются сечения или значения ординат в желаемых местах, начиная от 0, то-есть при $x = n, 2n, 3n \ldots\ldots\ldots mn$. Такой способ, как он ни кажется прост и точен, не дает всей возможной точности при употреблении обычных способов, но зато представляет результат в наглядной форме, облегчающей все дальнейшие расчеты и устраняющий возможность грубых погрешностей.

Алгебраический способ состоит в расчете сечения при искомом месте по данным сечениям, находящимся около него, то-есть в интерполировании. Но если бы применять здесь интерполирование по способу наименьших квадратов, то работа расчета оказалась бы весьма утомительною. Прямо же по двум ближайшим к искомым данным не следует находить сечения по причине погрешностей, свойственных каждому числу. А потому, взяв несколько ближайших данных [2] к тому месту трубки, для которого отыскивается сечение, я графически определяю те коэффициенты, которые, вероятнее всего, должно применить для этой части кривой, и по ним [3] нахожу по каждому данному искомое сечение, а среднее принимаю за вероятнейшее.

Пусть требуется найти сечение при делении x, а даны сечения s_1 при $x_1 = x + d_1$, s_2 при $x_2 = x + d_2$, s_3 при $x = x + d_3$ и s_4 при $x_4 = x + d_4$. Нанеся на оси абсцисс d_1, d_2, d_3, d_4 и восставив ординаты s_1, s_2, s_3 и s_4, увидим, например, что вершины ординат, в пределах погрешностей опыта, лежат на прямой. Коэффициент этой прямой легко определяется из графических данных, разделив разность ординат двух точек этой прямой на разность абсцисс этих точек. Назовем этот коэффициент чрез a, а потому имеем, по первому данному (для x_1), что сечение при x равно $s_1 - ad_1$, по второму $s_2 - ad_2$ и т. д. Среднее из всех принимается за сечение при x. Если вершины ординат s_1, s_2, s_3 ....., соседних с x, очевидно, не лежат на прямой, то расчет про-

---

[1] Наносятся, конечно, не самые значения, а только их разности от некоторого значения, близкого к наименьшему сечению.

[2] Сколько именно, это зависит от того: 1) как часто в данном месте перемещалась капля и 2) от того, как быстро в нем меняются сечения.

[3] Если расстояния взятых данных от x не велики и лежат по обе его стороны, то хотя бы в коэффициентах и была сделана некоторая погрешность, зависящая от способа проведения кривой, в среднем результате расчета будет меньше погрешности, чем в том случае, если бы ординату для x взять прямо графически, ибо тогда вся неточность в проведении кривой будет находиться в x. Способ этот, как я убедился многократно, дает быстро результаты интерполирования такого же достоинства, как и интерполирование по способу наименьших квадратов, если промежутки не велики.

изводится по кривой второго порядка, следующим образом. Сперва вершины ординат соединяются вероятнейшею кривою, которая, конечно, не должна удаляться от результата опытов более, как на расстояние, отвечающее возможной погрешности. Потом чрез равные промежутки абсцисс (например чрез сантиметр по длине трубки) берутся ординаты начерченной кривой и по ним определяются коэффициенты a для множителя в первой и b во второй степени.

Пусть, например, промежуток взятых абсцисс равен n и пусть при $x-2n$ абсцисса будет $=t_{-2}$, при $x-n$ она t_{-1}, при x она $=t_0$, при $x+n$ она $=t_1$ и при $x+2n$ она $=t_2$. Взяв соответственные первые разности $t_{-1}-t_{-2}$; t_0-t_{-1}; t_1-t_0; t_2-t_1 и вторые разности $(t_{-2}-2t_{-1}+t_0$; $t_{-1}-2t_0+t_1$; $t_0-2t_1+t_2)$, получим данные для определения коэффициентов a и b, ибо b равно среднему из вторых разностей, деленному на $2n^2$, а величина a получится, если из t_{-2} вычесть $b(x-2n)^2$, из t_{-1} вычесть $b(x-2n)^2$ и т. д., а остатки последовательно вычесть друг из друга, взять среднее из полученных разностей и разделить его на n. [1] Когда таким образом получены a и b, то искомое сечение будет по первому данному $s_1-d_1(a+bd_1)$, по второму $s_2-d_2(a+bd_2)$ и т. д. Среднее значение даст вероятное сечение при x.

Чрез описанный прием сглаживаются небольшие недостатки определений и получаются значения, более близкие к действительности, чем результаты прямого измерения, как можно в том убедиться, производя более точное новое калибрование, как делал я не раз.

§ 68

В результате вышеописанного расчета получатся сечения чрез определенный небольшой промежуток n по всей трубке. [2] Назовем чрез n (например n миллиметров) тот промежуток, чрез который разочтены сечения, [3] а потому, начиная от 0, получим в результате предшествующего расчета *второе приближение* [4] для сечений, а именно пусть:

Места трубки:	0	n	$2n$	$3n$	$4n \ldots in$
Сечения:	s'_0	s'_1	s'_2	s'_3	$s'_4 \ldots s'_n$.

В величине этих сечений могут заключаться погрешности, зависящие от многих причин, а преимущественно от: 1) погрешностей от-

[1] Сущность дела, таким образом, очевидно, сводится на интерполирование при равных промежутках.

[2] Сомнение может быть по концам, ибо на них приходится эксполировать, а потому должно при калибрации всегда брать трубку длиннее, чем должно впоследствии иметь, чтобы затем концы не применять к делу.

[3] Наилучший результат выходит, когда при первом калибровании перестановка капли производилась каждый раз на величину меньшую, чем n.

[4] Первое приближение получается по прямым данным опыта и найдено в таблице § 66.

чета; 2) неравенства температур во все время измерения [1] одною каплею, ибо тогда объем ее меняется, а он считается при расчете постоянным; [2] 3) возможности пропусков некоторых отступлений в сечениях, если при первой калибрации (чего не должно быть при тщательной работе) длина капли была меньше промежутка, на который она передвигалась. 4) Важнейшею же причиною неточности может быть то обстоятельство, когда взята для первой калибрации капля такой значительной длины, что на протяжении ее и двух с нею соседних встречаются короткие раздутия и сужения такого рода, что в пределе погрешности наблюдения для трех положений капли нельзя уже считать справедливым параболическую зависимость сечений от расстояний, то-есть нельзя допустить гипотезу, выраженную формулою I.

Дабы узнать меру неточности, а если она не велика, то для того, чтобы ввести поправку в полученные данные, я произвожу после измерений малою каплею еще измерения длинною каплею. Она наполняет, если только внутренность трубки чиста, [3] все неровности трубки и дает относительный объем больших долей трубки. Длинною каплею называю я такую, которая по крайней мере раз в 10 превосходит короткую и расстояние n, для которого даны вторые приближения сечений. Прежде, чем изложить способ пользования данными, получаемыми с длинною каплею, необходимо сказать, что введение и изменение ее не представляет других особенностей противу тех, которые применяются при калибрации короткою каплею, кроме того, что здесь необходимо обратить большое внимание на изменение температуры. Если, например, капля занимает длину 200 делений (напр. мм.), то изменение ее температуры на 1° влечет за собою изменение длины на 0,03 деления, а такую величину должно при сколько-либо точном калибровании легко определять, изменения же в температуре при производстве наблюдений от приближения наблюдателя и от освещения [4] могут достигать до нескольких градусов. Для устранения малоточных температурных поправок, основанных на показаниях термометра, я поступаю таким образом. С самого начала наблюдений капля устанавливается на средине трубки и замечается положение одного конца

---

[1] Для устранения его я производил несколько калибрований, окружив изучаемую трубку другою трубкою, чрез которую протекал ток воды определенной температуры, но дело выходит сложным и получаются новые несовершенства отчета, зависящие от преломлений. Во всяком случае около изучаемой трубки должно помещать термометр и следить, чтобы температура значительно не изменялась.

[2] Если знать перемены температур или если после нескольких измерений капли ее отводить на начальное место, то легко сделать поправку.

[3] А очищать капиллярные трубки по способу, описанному в § 37, хотя и трудно, но возможно, заставляя промывные жидкости проникать чрез трубку под усиленным давлением в 5 или более атмосфер. Еще лучше, как я делаю, прямо на заводе запаивать концы трубки.

[4] Для устранения влияния лампы, если она употребляется для освещения в этом и других подобных случаях, я употребляю особые стклянки с эллиптическим сечением. Они наполняются водою и помещаются между лампою и трубкою параллельно последней и в таком от нее расстоянии, чтобы фокус эллипса был на трубке. Такие стклянки, очевидно, удерживают теплые лучи лампы и содействуют равномерному и яркому освещению всех частей трубки.

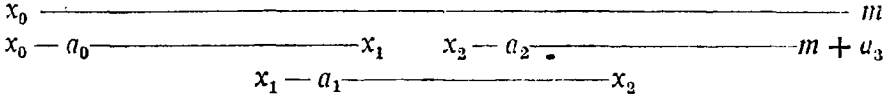
и длина капли. Потом измерения производятся, переводя каплю с одного конца трубки до другого. Когда дойдет дело до средины, капля устанавливается по возможности в первоначальное среднее положение и ее длина вновь меряется. Это повторяется и при конце наблюдений. Пусть в этом среднем положении капля имела длины l_1, l_2 и l_3 и пусть в промежутке двух отчетов сделано m определений. Разделяя $l_2 - l_1$ на $m + 1$ и прикладывая к первому наблюдению один раз, ко второму два раза полученную дробь и т. д., получим все показания, отнесенные к тому времени, когда капля измерялась при средине и имела длину l_2. Эту поправку можно считать достаточною, если разности $l_2 - l_1$ и $l_3 - l_1$ не велики и времена наблюдений возможно коротки. В противном случае нахождение поправки должно сделать чаще.

Что касается до выбора длины капли, то она должна быть немногим более определенной доли всей трубки в тех частях ее, которыми предполагается пользоваться; например, если трубка имеет длину 600 мм., то можно взять каплю, занимающую длину, немногим бо́льшую 200.

Первое положение капли должно быть по возможности близко к начальному делению x_0. Пусть оно будет от x_1 до x_1'. Второе положение должно быть близко к концу первого, пусть например оно будет от x_2 до x_2', где x_2 близко к x_1', но меньше его. Так пройдем всю трубку, а последнее положение должно быть таким, чтоб капля занимала место от x_3' до x_3', где x_3' близко к другому концу трубки. По совокупности полученных данных и таблице вторых приближений легко достичь: 1) открытия крупных недостатков первой калибрации, если они имеются, 2) поправки вторых приближенных сечений и 3) деления трубки на равные доли объема. Для этого я поступал нижеизложенным способом, для простоты объяснения которого предположу, что длинная капля действительно близка к $^1/_3$ емкости всей трубки и что в ее концы в трех положениях были:

1-е положение: от $x_0 - a_0$ до x_1, где a_0 есть малая величина,
2-е „ „ $x_1 - a_1$ до x_2, где a_1 есть также малая величина,
3-е „ „ $x_2 - a_2$ до $m + a_3$, где m конец трубки и a_3 малая величина.

Очевидно из прилагаемой схемы, что объем части трубки от $x_0 - a_0$ до $x_1 - a_1$ равен объему от x_1 до x_2 и также объем от $x_1 - a_1$ до $x_2 - a_2$ равен объему от x_2 до $m + a_3$.



По таблице вторых приближений разочтем эти объемы. Если они окажутся действительно одинаковыми в пределе погрешности определений, то в калибровании нет пропусков и грубых ошибок, тогда должно ввести только некоторые малые поправки в таблицу вторых приближений. Если при расчете объемы, долженствующие быть равными, выйдут значительно различными, где либо есть погрешность,

которую и должно разыскать или новым расчетом добытых данных, или повторением предшествующих (с короткою каплею) наблюдений.

Для того чтобы по таблице вторых приближений найти объем трубки между некоторыми пределами x и x', должно найти определенный интеграл, то-есть плоскость между ординатами, выражающими сечения и отвечающими абсциссам от x до x'. Это достигается легко по общеизвестному правилу Симпсона, ибо в таблице вторых приближений даны ординаты чрез равные промежутки. Пусть нижний предел абсцисс x равен $An - b$, а верхний $x' = Bn + c$, где n есть тот промежуток, чрез который даны в таблице вторых приближений значения сечений, и где A и B есть целые числа, разность коих должна быть четное число; b и c суть малые части абсцисс, во всяком случае меньшие, чем $2n$. Площадь, отвечающую пределам от x до x', можно разделить на три части: одна от An до Bn будет составлять наибольшую часть, другая от x до An и третья от Bn до x'. Обе последние гораздо меньше первой площади и их можно определить, умножив разность из отвечающих им крайних абсцисс на ординату, отвечающую средине соответственного промежутка. Что же касается до площади между An и Bn, то взяв из таблицы все промежуточные и обе крайние ординаты (число всех их по условию, высказанному выше, будет нечетное, ибо разность $B - A$ четная и число частей n от An до Bn четное) и назвав их чрез

$$t_1 \quad t_2 \quad t_3 \quad t_4 \ldots t_{2k-1} \quad t_{2k} \quad t_{2k+1}$$

(очевидно, что здесь $2k = B - A$), получим по правилу Симпсона значение площади:

$$\tfrac{n}{3}[t_1 + 4t_2 + 2t_3 + 4t_4 + \ldots 2t_{2k+1} + 4t_{2k} + t_{2k+1}]$$

Слагая величины всех (одной большой и двух малых) площадей, получим значение площади, отвечающей предельным абсциссам x и x', то-есть объем части трубки от деления x до деления x', что и необходимо для сличения объемов, упомянутого выше.

§ 69

Для того, чтобы разделить трубку от начала x_0 до конца x_m на три [1] равнообъемные части, должно поступать подобным же образом. Только при этом должно пользоваться таблицею вторых приближений для одних малых дробей объема, [2] для деления же на крупные доли послужат размеры длинной капли. Способ рассуждения при этом следующий: весь объем трубки от x_0 до x_m равен объему трех больших капель: 1) без объема от $x_0 - a_0$ до x_0; 2) без объема от $x_1 - a_1$ до x_1; 3) без объема от $x_2 - a_2$ до x_2 и 4) без объема от x_m до $y_m + a_3$. Найдем

[1] Или вообще на кратное число частей, по круглому числу больших капель, входящих последовательно в целую трубку.

[2] Для точности результатов, очевидно, будет лучше, если эти доли будут очень малы.

эти четыре малых объема по таблице вторых приближений, сложим и разделим на 3. Частное покажет, сколько должно отнять от длины каждой капли, чтобы получить емкость, равную одной трети трубки. Назовем эту малую величину чрез b_0 и станем ее теперь последовательно отнимать от длины, занимаемой большей каплей. Так, например, для определения начальной трети трубки определим объем от $x_0 - a_0$ до x_0, отнимем его от b_0, а остаток отнимем от другого конца капли, что легко сделаем, зная, по таблице вторых приближений, сечение около этого конца. Разделив объем, который должно отнять, на величину сечения близ x_1, узнаем, сколько делений c_1 трубки близ x_1 занимают этот объем, а отняв c_1 от x_1, получим то место трубки $x_1 - c_1$, которое равняется первой трети ее емкости. Точно так же, начиная от конца x_m, узнаем место $x_2 - c_2$, которое отвечает последней трети емкости. Верность расчета проверим по среднему положению капли, потому что объем от $x_1 - c_1$ до $x_2 - c_2$ равен средней трети трубки и должен быть равен объему капли в среднем положении трубки (от $x_1 - a_1$ до x_2) без b_0, следовательно, объем b_0 равен объему от $x_1 - a_1$ до $x_1 - c_1$, сложенному с объемом от $x_2 - c_2$ до x_2. После проверки найдем места трубки $x_1 - c_1$ и $x_2 - c_2$, делящие ее на три равных объема, начиная от x_0 до x_m.

Имея по данным большой капли крупные, равнообъемные доли трубки, найдем теперь по таблице вторых приближений (пользуясь правилом Симпсона) объемы этих частей. Они выйдут не совершенно одинаковыми между собою, что зависит от причин вышеуказанных (стр. 171 [=466]), хотя бы и не было грубых неточностей наблюдения и расчет был верен. Эти различия, зависящие от погрешностей многих наблюдений малыми каплями, должны быть теперь исправлены по данным, полученным с бо́льшею каплею. Назовем объем, найденный по таблице вторых приближений и по значениям $x_1 - c_1$ и $x_2 - c_2$, для первой трети w_1, для второй w_2 и для третьей w_3; сумма их есть объем всей трубки; истинная величина одной трети трубки будет $\frac{w_1+w_2+w_3}{3}$. Отношение этой величины к w_1 покажет, на сколько ошибочны данные в таблице вторых приближений величины сечений для первой трети, а потому каждое из них должно умножить на $\frac{w_1+w_2+w_3}{3w_1}$. Точно так же сечения, лежащие во второй трети, должно умножить на $\frac{w_1+w_2+w_3}{3w_2}$ и т. д. Поступая так с новыми большими каплями, поправим данные второго приближения и найдем данные третьего приближения, которые будут тем ближе к истине, чем точнее будут сделаны измерения с большими каплями и чем длина этих последних будет взята соответственнее условиям точности проверки. Так, например, в большинстве случаев достаточно разделить описанным способом трубку на 3, а потом на 5 частей. При последнем делении получится новая проверка данных и если затем произвести деление трубки, например, пополам, то оно обыкновенно оказывается совершенно точным, по исправленной таблице сечений и по наблюдению.

Таким образом получается таблица третьих и последних приближений для сечений. Она отвечает вполне таблице 2-х приближений и мало отличается от нее.

По исправленной таблице сечений легко составляется необходимая для практических применений таблица отчетов. Пусть, например, после превращения трубки в термометр и по установке его постоянных точек x_a и x_b, отвечающих t_a и t_b (например 0° и 100°), потребуется разделить трубку на $t_b - t_a$ равнообъемных частей. Для этого по таблице сечений, пользуясь вышеуказанным приемом (по правилу Симпсона или Чебышева), найдем объем от x_a до x_b, разделим его на $t_b - t_a$, получим v и разочтем, каким делениям трубки отвечает придача 10 v, 20 v и т. д. к объему до x_a. Найденные места трубки будут те искомые подразделения на равнообъемные доли некоторой части трубки, которые требуются в термометрии и при других применениях капиллярных трубок.

Те из читателей, которые знакомы с литературою способов калибрования и которые сверх того испытали хотя некоторые из них, увидят в моем способе устранение разных недостатков обычных приемов и особенностей, состоящие преимущественно в том, что: 1) Калибрация ведется последовательно и каждый следующий прием улучшает данные предшествующих калибрований, так что нет излишнего труда. 2) Все действия, как при измерении, так и при расчете направлены к совершенно ясным, определенным целям. 3) Измерения большими каплями, на которых основываются столь многие способы калибрования, применяются только в малом числе для делений трубки на крупные доли, то-есть при перемещении капли почти на всю ее длину, а не на малые доли ее, [1] что сопряжено с большими погрешностями, зависящими от изменения температуры ртути. 4) Перемещение капель на строго определенные места (как в способах Гей-Люссака и Реньо), сопряженное с случайными и большими погрешностями, совершенно исключено из приемов калибрации, употребляемых мною. 5) Для всей длины трубки при моем способе калибрования нет нужды в какой-либо гипотезе для выражения изменения радиусов, сечений или объемов, гипотеза для сечений применяется только к малой длине трубки, да и то предполагается, что на ней трубка имеет сечения, изменяющиеся по закону параболы, а не прямой. 6) Все расчеты ведутся с сечениями, а не с длинами капель, что и делает результат расчета реальным. 7) Приемы для готового термометра будут совершенно те же, как и для трубки, назначаемой для наполнения. [2] 8) Степень точности результата мало зависит от числа измерений (сравн. способ Бесселя). 9) Представляется возможность точной проверки данных, полученных с малыми каплями, при помощи больших.

---

[1] Известно, что при перемещении большой капли от x_1 до x_n в x_2—x_m получаются равнообъемные доли x_1—$x_2 = x_n$—x_m. Этим пользуются часто при калибрации, но тогда вся температурная погрешность взойдет в результат.

[2] Известно, что в термометре можно оторвать каплю любой длины и что некоторые способы калибрации не применимы для готового термометра.

В практическом отношении считаю неизлишним заметить, что при моем способе на каждом шагу представляется возможность скоро узнать погрешность расчета или наблюдения и что при навыке все измерения трубки в 500—600 мм. длиною легко кончаются в течение одного дня, так как число измерений с малыми и большими каплями не превысит 100, а для каждого требуется средним числом не более 3-х минут даже тогда, когда каждое измерение повторяется по два раза.

§ 70

Объяснив с надлежащею подробностью все приемы, употребляемые мною при калибрации трубок, для примера я выбрал самую короткую из всех исследованных мною трубок, чтобы по возможности сократить изложение. Пример этот не отличается полнотою (в трубке нет вздутий, она довольно равномерно конична, а в работе нет ни исследования с короткими и очень длинными каплями, ни определения абсолютной величины сечений), потому что для той цели (для термометра при обыкновенных температурах), для которой исследовалась трубка, не было надобности в подробном ее изучении, достаточно было иметь сведение об относительных объемах средних ее частей, поэтому и сделано было всего 24 определения. Более полный пример с оценкою данных я, может быть, буду иметь случай привести в дальнейшем изложении. Взятый пример должен служить только для уяснения приемов расчета.

Для калибрования взята трубка, на которой нанесено 132 деления чрез 2 мм. алмазом. [1] Проверка делений показала только в двух местах погрешность в 0,013 и 0,011 мм., а в других делениях она не превышала 0,005, а так как отчет при калибровании на каждом конце был точен не более, как на 0,005, то на деления я не считал нужным делать никакой поправки. Взята была капля, занимающая около 10 делений и она передвигалась в этот раз по возможности из конца в конец. Подле того места трубки, которое наблюдалось, помещен был шарик термометра, прикрепленный к микроскопу; его показания отчитывались каждый раз и приведены в прилагаемой таблице:

	Отчет длины капли по числу делений и по микрометру	Положение средины капли	Температура капли	Длина капли при 16° в делениях трубки
1)	9,265	4,65	15,°8	9,265
2)	9,392	13,98	15, 9	9,392
3)	9,474	23,42	16, 0	9,474
4)	9,525	32,91	16, 2	9,525
5)	9,569	42,47	16, 3	9,569
6)	9,654	52,08	16, 5	9,653

[1] Такие трубки с делениями чрез 2 и даже чрез 5 мм. я применяю для термометров, для того чтобы иметь на них как можно менее делений, препятствующих отчету, а подразделения производить микрометром, как о том будет речь в главе о термометрах.

	Отчет длины капли по числу делений и по микрометру	Положение средины капли	Температура капли	Длина капли при 16° в делениях трубки
7)	9,742	61,78	16,°7	9,741
8)	9,989	71,63	16, 8	9,988
9)	10,118	81,65	16, 9	10,117
10)	10,227	91,79	17, 1	10,225
11)	10,415	102,10	17, 2	10,413
12)	10,542	112,59	17, 3	10,540
13)	10,656	123,20	17, 4	10,654
14)	10,682	126,70	15, 1	10,684

На другой день (9 ноября 1873 года) были произведены с тою же каплею еще пять определений:

15)	10,592	117,68	15,°1	10,594
16)	9,836	66,92	15, 5	9,837
17)	10,054	76,19	15, 5	10,055
18)	9,686	54,68	15, 5	9,687
19)	9,704	57,17	15, 5	9,705

Обработка этих данных начата с того, что из таких близких определений как 6 и 18, 19, 7 и 16, 8 и 17, 15 и 13 взято среднее, ибо близкие определения не могут дать с точностью величин b и c (§ 66).[1] Таким образом получены 14 данных для мест капли x и для длины l. В приложенной таблице приведены затем, в 3-м столбце y, то-есть первые приближения сечений, при чем V принято $=11\,000$,[2] в 4-м — значения первых разностей b, в 5-м — вторых разностей c, в шестом — поправок $-\frac{c}{12}l^2$, в 7-м столбце даны исправленные сечения s, составляющие вторые приближения. При этом значение сечений на краях трубки определено эксполированием и, как подлежащее сомнению, приведено в скобках.

---

[1] Зависит это от того, что b получается делением разностей длин на разность перемещений, и если знаменатель мал, то погрешность в малой величине числителя будет оказывать тогда большое влияние на частное, а от его погрешности зависит и погрешность в c.

[2] Число это взято для того, чтобы частное из V на l везде было около 1000 и более ее. Так как в l есть наверное погрешность в тысячных миллиметра, то есть в десятитысячных от l, то цифры, стоящие за запятою, заключают уже наверное погрешность, а потому расчет не веден для s и y далее десятых.

Места трубки по делениям	Длина капли в делениях	Первое приближение сечений	Первые разности	Вторые разности	Поправки	Вторые приближения сечений
x	l	y	b	c	$-\frac{c}{12}l^2$	s
4,65	9,265	1187,3				(1186,9)
			−1,77			
13,98	9,392	1171,2		+0,04	−0,3	1170,9
			−1,07			
23,42	9,474	1161,1		+0,02	−0,2	1160,9
			−0,66			
32,91	9,525	1154,8		0,00	0,0	1154,8
			−0,70			
42,47	9,569	1149,5		−0,02	+0,2	1149,7
			−1,10			
53,38	9,670	1137,5		0,00	0,0	1137,5
			−0,93			
61,96	9,761	1126,9		−0,07	+0,6	1127,5
			−2,44			
73,91	10,021	1097,7		+0,05	−0,4	1097,3
			−1,36			
81,65	10,117	1087,2		+0,01	−0,1	1087,1
			−1,13			
91,79	10,225	1075,4		−0,04	+0,3	1075,7
			−1,89			
102,10	10,413	1056,3		+0,03	−0,3	1056,0
			−1,21			
112,59	10,540	1043,6		+0,01	−0,1	1043,5
			−1,05			
120,44	10,624	1035,4		+0,01	−0,1	1035,3
			−0,94			
126,70	10,684	1029,5				(1029,4)

Так как в этой трубке все поправки, даже при такой большой капле, какая взята здесь, столь незначительны, что почти впадают в погрешности определений, то здесь не было нужды прибегать к капле меньшего размера, и сечения для кратных делений найдены были непосредственно по данным предшествующего определения. В прилагаемой таблице даны выводы такого интерполирования: [1]

[1] Графическое изображение показывает, что при постоянной убыли сечений в их изменении встречаются в этой трубке три вогнутости: около 20, 75 и 110 и две выпуклости: около 60 и около 90. Подобные этим малые волны свойственны всяким трубкам. Они то и составляют предмет трудности в изучении трубок. Пренебрегая этими малыми волнами, можно принять $s = 1204 - 1{,}4\,x$.

$x =$ 5	первые	приближения	для	сечений	$s' = (1186{,}2)$
15	„	„	„	„	$= 1169{,}5$
25	„	„	„	„	$= 1159{,}6$
35	„	„	„	„	$= 1153{,}4$
45	„	„	„	„	$= 1147{,}4$
55	„	„	„	„	$= 1136{,}2$
65	„	„	„	„	$= 1120{,}2$
75	„	„	„	„	$= 1094{,}9$
85	„	„	„	„	$= 1084{,}1$
95	„	„	„	„	$= 1070{,}2$
105	„	„	„	„	$= 1051{,}8$
115	„	„	„	„	$= 1040{,}8$
125	„	„	„	„	$= (1030{,}9)$

Затем была взята капля, примерно в три раза превышающая предшествующую, и по исправлении на небольшие (не превосходящие 2° или 0,008 мм.) температурные изменения положения ее концов были:

20)	От	0,407	до	25,256	делений	трубки
21)	„	25,242	„	50,610	„	„
22)	„	50,606	„	76,697	„	„
23)	„	76,685	„	103,898	„	„
24)	„	103,874	„	132,087	„	„

Для суждения о правильности предшествующей калибрации могут служить только 21, 22 и 23 определения, потому что близ концов сечения с точностью неизвестны. Расчет для наблюдения 21 есть следующий, сообразно изложенному в § 69. Площадь между ординатами, отвечающими 25,242 и 50,610, или объем между этими делениями трубки, разделяется на 3 части: 1) от 25 до 25,242. Эта площадь должна быть взята с отрицательным знаком. Так как ордината при 25 = 1159,6 а при 25,242 равна 1159,4, то эта площадь = —0,242. 1159,5 = = 280,60. 2) от 45 до 50,610. Ордината при 45 = 1147,4 при 50,610 равна = 1142,0, следовательно объем = 5,61 · 6144,7 = 6421,77. 3) От 25 до 45 объем равен $^{10}/_{3}$ (1159,6 + 4 · 1152,4 + 1147,4) = = 23068,67. Поэтому весь объем от 25,242 до 51,610 = 29209,8. Точно так разочтем, что объем для пространства трубки от 50,606 до 76,697 = = 29234,1, а от 76,685 до 103,898 он = 29276,6. Так как отступления найденных объемов от среднего объема 29240,2 не превышают 36,6, а такое отступление не превосходит возможной погрешности в определении сечений, [1] то общий объем должно считать удовлетворитель-

[1] Так как для определения их употреблена капля длиною в 10 делений, а погрешность в определении длины может достигать (и превышать) 0,02, то в сечении от одной этой причины возможна погрешность $= s\frac{d}{l}$, где s — сечение, l — длина капли и d — погрешность ее определения; здесь погрешность сечения, может быть,

ным. Очевидно, что объем от 0,407 до 25,256 должен иметь ту же величину, судя по 20 наблюдению, а это дает возможность узнать сечения близ 0, потому что весь объем 29240,2 можно разделить на неизвестный объем от 0.407 до 10 и на известный от 10 до 25,256. Этот последний равен 17789,9, следовательно, объем от 0,407 до 10 равен 11450,3, а потому, приняв при 10 сечение равным 1177,5, как следует по интерполированию прямых данных опыта, получаем [1] для $x = 0{,}407$ сечение $= 1210{,}7$, что хорошо согласуется с тем направлением кривой, выражающей сечения, которое получается по вторым приближениям. Поэтому при 0 сечение должно принять $= 1212{,}8$. Точно так найдем по 24-му наблюдению сечение при 132,087 $= 1016{,}0$, а потому оно при $132 = 1016{,}2$.

На основании того, что средний объем капли $= 29240{,}2$, выводим далее, что поправка между 25 и 50 получится, умножая сечения на $\frac{29240{,}2}{29209{,}8} = 1{,}00104$ в пространстве от 50 до 76 делений множитель $= 1{,}00021$, от 76 до 103 он $= 0{,}99876$. Исправив таким образом величины сечений, найдем 3-е приближение. Средняя поправка, вводимая при этом $= 0{,}6$ сечения, а потому величина ее находится в пределе возможных погрешностей опыта. Введя все предыдущие поправки, получаем следующую таблицу третьих приближений:

$x =$	$s'' =$	$x =$	$s'' =$	$x =$	$s'' =$
0	1212,8	45	1148,6	95	1068,9
5	1194,3[2]	55	1136,4	105	1050,5
15	1169,5	65	1120,4	115	1040,8
25	1160,8	75	1095,2	125	1027,9
35	1154,6	85	1082,8	132	1016,2

Значения s'' при концах остаются сомнительными, но трубка назначалась для такого термометра, в котором приходилось пользоваться только средними делениями, а потому для крайних и не было сделано проверки малою каплей, как должно было бы сделать, если бы значение сечений в этих местах трубки следовало знать с большею точностью. В том применении, для которого назначалась трубка, пришлось вести счет снизу, то-есть от того деления, которое ныне считалось за 132[3] и потому объемы V разочтены далее, производя счет от 132 и называя чрез x' деление $132 - x$. Объемы рассчитаны по сечениям и считаются от $x' = 0$.

значит $= 1100 - \frac{0{,}02}{10} = 2{,}2$, а погрешность объема = длине капли на погрешность сечения. В нашем случае длина капли была около 26, следовательно возможна погрешность $2{,}2 \cdot 26$, то есть 57, а наибольшее отступление 36,6, следовательно она лежит в пределе возможных погрешностей.

[1] Площадь эта равняется $\frac{(10 - 0{,}407)}{2} \frac{1177{,}5 + x}{} = 11450$, где x есть ордината при 0,407, которая и найдется по уравнению.

[2] Сечение при 5 и 125 определены прямо интерполированием из данных для 0, 15 и 25 или для 105, 115 и 132.

[3] На этой трубке нет надписей при делениях, ибо крупные числа легко читать приставив миллиметрическую линейку, поэтому положение 0 делений произвольно.

Деление трубок	Сечение при x'	Коэффициент при x'	Объем от x' до x'_{n+10}	Объем от 0 до x'
x'	s	k	w [1]	v
0	1016,2	1,82		0,0
			10245,5	
10	1032,1	1,32		10245,5
			10382,0	
20	1043,6	0,88		20627,5
			10485,5	
30	1054,0	1,20		21113,0
			11634,0	
40	1073,4	1,56		41747,0
			10802,2	
50	1086,2	1,05		52549,2
			10930,0	
60	1102,6	2,72		63479,2
			11151,1	
70	1126,0	1,71		74630,3
			11336,7	
80	1140,6	1,25		85967,0
			11461,7	
90	1150,8	0,66		97428,7
			11536,5	
100	1156,3	0,54		108965,2
			11594,2	
110	1162,8	0,70		120559,4
			11687,2	
120	1174,6	1,92		132246,6
			11883,9	
130	1205,0	3,68		144130,5

В этой таблице даны коэффициенты k, представляющие изменение сечения на 1 деление и позволяющие расчесть сечения желаемых мест. Так, например, для 74,52 сечение равно 1126,0 $+ k$ 4,52, где k есть коэффициент изменения сечения между 70 и 74,52 делениями, то-есть коэффициент, отвечающий среднему делению 72,26. Так как для 70 $k = 1{,}71$, для 80 $= 1{,}25$, то для 72,26 его должно принять $= 1{,}61$, а потому сечения при 74,52 $= 1126{,}0 + 7{,}3 = 1133{,}3$. Объемы v, приведенные в последней графе, дают те величины, для нахождения коих чаще всего производится калибрация. Так, например, пусть в нашей трубке, употребленной для термометра, 0° лежит при 20 делении, а 20° при 100 делении, наблюдено же, что при некоторой температуре ртуть останавливалась на 80-м делении. Кажущаяся температура есть

[1] Эти объемы от x_1 до x_2 рассчитаны по соответственным сечениям s_1 и s_2 и коэффициентам их изменений $k_1 + k_2$, руководствуясь правилом Симпсона и разделяя все пространство $x_1 - x_2$ на 4 части. Поэтому $w = 5\,[s_1 + s_2 + {}^5/_2\,(k_1 - k_2)]$ или $w = 10\,\frac{s_1 + s_2}{2} + 8\,(k_1 - k_2)$.

$\frac{80-20}{100-20}\,20 = 15°{,}00$, а истинная по ртутному термометру $=$
$= \frac{85967{,}0-20627{,}5}{108965{,}2-20627{,}5}\,20 = 14°{,}793.$

Для суждения о мере погрешности в числах окончательного расчета должно принять прежде всего во внимание меру погрешности отчета длин капли. Она в тех определениях, которые послужили для вывода сечений, была на каждом конце, вероятно, около 0,01 деления, а так как длина определяется двумя микроскопами, то погрешность длины должно считать могущею достигать до 0,02 деления, а так как длина капли была около 10 делений, то в результате каждого сечения возможна относительная погрешность в 0,002, а как сечение равно около 1100, то погрешность в отдельном данном сечении может достигать до 2,2. В объеме w она, вероятно, не превосходит этой величины, а в сумме объемов v она, конечно, не может достигать величины, во столько раз превосходящей погрешность в w, во сколько v больше w, ибо для этого нужно было бы, чтобы все слагаемые были с погрешностью в одну сторону, а потому в величине v нельзя ждать значительной погрешности. Для описания трубки не было сделано тех определений, какие делались мною в длинных трубках и давали возможность судить о мере погрешности в v. Для этого брались очень большие капли и сличался их объем, полученный по расчету. Погрешность после нахождения третьего приближения никогда не превышала при этом $^1/_{2000}$ всей величины объема.

§ 71

Считаю неизлишним, сверх описанного выше способа калибрования трубок малого диаметра, указать еще на один способ, которого я не имел времени исследовать подробнее, но, по предварительным опытам, способ этот обещает дать хорошие результаты. Дело в том, что в капиллярных трубках жидкость, хорошо смачивающая стенки, поднимается на значительную высоту, зависящую от периферии внутреннего отверстия трубки в том месте, где находится мениск. Если отверстие трубки имеет круговое сечение, то близкие диаметры трубок, при одинаковой степени смачивания стенок, относятся между собою обратно пропорционально высотам поднятия в них жидкостей. Следовательно, если мы узнаем высоты поднятия данной жидкости при положении мениска в разных местах трубки, мы узнаем отношение диаметров трубки в этих местах. На этом можно основать способ калибрации. Практика этого способа состоит в следующем. Над длинною и широкою, снизу запаянною, стеклянною трубкою укрепляется герметически воронка. Трубка и воронка наполняются водою или еще лучше амиловым спиртом, [1] ибо он смачивает стекло гораздо лучше

[1] Если требуется применить мастику для соединения приборов, содержащих спирт и т. п. жидкости, растворяющие мастику, как в случае здесь описываемом, то проще всего устраняется доступ спирта к мастике, если покрыть последнюю слоем ртути. Так в описываемом случае трубка вставляется в воронку, соединение замастичивается и в образовавшийся утор (между трубкою и нижними частями воронки) вливается слой ртути. Этот прием приходится часто применять при изучении спиртообразных жидкостей.

воды и хотя поднимается ниже воды, но при тонких трубках меньшая высота поднятия не влечет за собою бо́льшей погрешности в определениях ее величины. В эту воду опускается конец капиллярной трубки, близкой по диаметру к той, которая исследуется. Эта добавочная трубка укрепляется неподвижно на все время исследования, верхний ее конец снабжен каучуковою трубкою и из нее по временам высасывается понемногу воздух для того, чтобы этим способом заставить воду в капиллярной трубке подняться на некоторую высоту и смочить стенки, находящиеся над мениском. Этим способом достигается правильное, всегда однородное смачивание, если внутренние стенки трубки чисты. Тотчас подле этой трубки помещается исследуемая капиллярная трубка. Сперва трубка эта погружается, сколь возможно глубоко, в воронку, так чтобы почти вся исследуемая капиллярная трубка помещалась под водою. На верхнем свободном конце исследуемой трубки также прикрепляется каучуковая трубка, служащая для всасывания воздуха и смачивания стенок трубки водою поверх мениска. Когда исследуемая трубка установлена и стенки ее смочены водою поверх мениска, тогда катетометром определяется разность высот менисков в обеих, рядом стоящих трубках и отмечается положение мениска по отношению к делениям исследуемой трубки. Затем она выдвигается отчасти из воды так, чтобы мениск приходился на других делениях трубки, и опять катетометром определяется разность высот в исследуемой трубке и в неподвижной. После того трубка вновь вынимается отчасти из воды, и такая же операция производится до самого конца трубки. Если диаметры исследуемой трубки в разных местах ее неодинаковы, то и высота воды будет неодинакова; а так как в неподвижной трубке высота остается постоянною, то наблюденные разности высот будут представлять разности высот капиллярного поднятия в разных местах исследуемой трубки. Так как неподвижная и исследуемая трубки находятся в условиях одинаковых относительно температуры, то хотя бы в течение опыта и произошло изменение в температуре, а следовательно и в капиллярном поднятии, оно не будет иметь никакого влияния на относительную разность высот поднятия, потому что при перемене температуры единовременно изменится высота поднятия не только в исследуемой, но и в неподвижной трубке; а при исследовании определяется разность высот поднятия в обеих трубках. После окончания такого сравнения необходимо только узнать, и то приблизительным образом, если диаметры малы, высоту поднятия воды в неподвижной трубке. Непосредственное измерение катетометром может дать эту высоту, если только в воронку будет с осторожностью прилито такое количество воды, что она будет видна чрез край воронки. Исследовав этим способом одну из таких трубок, которая предварительно была изучена при помощи вышеописанного способа калибрования ртутною каплею, я нашел, что разности в определении диаметров не превосходят возможных пределов погрешности наблюдения, как видно из прилагаемого сопоставления. В этом последнем, для определения высоты поднятия, к наблюденной высоте нижней части мениска прибавлялась $^1/_3$ ра-

диуса трубки, дабы получить всю полную высоту поднятия жидкости в трубке.

Исследуемая трубка по калибрации ртутною каплею имела:

при	20	30	40	50	60
сечение =	1023,2	1020,7	1008,3	1009,1	1015,0
при	70	80	90 делений		
сечение =	1027,8	1042,1	1050,3		

Поэтому, приняв диаметр при 40-м делении равным 1000, имеем: диаметр = 1007,3 1006,1 1000,0 1000,4 1003,3 1009,7 1016,6 1020,6.

Для наблюдения был взят амиловый спирт. Поднятие (с поправкою на высоту мениска) его в трубке, поставленной рядом с исследуемою, равнялось 82,735 мм., а когда вершина мениска была в изучаемой трубке при 40-м делении, то разность высот поднятия в обеих трубках была = +1,832 мм., следовательно, высота поднятия при 40-м делении = 84,567 мм. При других положениях мениска высоты поднятия были найдены таким же способом и, разделяя 84,567 на найденную высоту поднятия, получились для вышеуказанных мест трубки следующие диаметры:

диаметр 1007,8 1006,2 1000,0 1000,2 1001,9 1009,9 1016,3 1021,0.

Разность от предшествующих чисел равна:

−0,5 −0,1 0,0 +0,2 +1,4 −0,2 +0,3 −0,4.

Она не превосходит возможных погрешностей опыта.

Описываемый способ отличается быстротою и, что особенно важно, он дает действительный диаметр в том месте, где образуется мениск. Конечно, он мало точен для трубок значительного диаметра, но даже для трубок с диаметром в 1 мм. он может быть употреблен с уверенностью, ибо для них поднятие воды = 28 мм., а амилового спирта = = 12 мм., а при таком поднятии легко определяются тысячные доли, что составляет обычный предел точности калибрования. Для трубки диаметром в 0,1 мм. поднятие = 120 мм.

Способ наблюдения высоты поднятия воды в капиллярных трубках особенную пользу оказывал мне в тех случаях, когда необходимо было избирать трубки равного диаметра, по крайней мере в некоторых их частях. Такой случай представляется чрезвычайно часто в исследованиях, например, для составления небольших манометров с двумя ветвями, которые желательно иметь по возможности с одинаковыми диаметрами. В этом случае одна из избранных трубок помещается в воду, а рядом с нею помещается другая исследуемая трубка. Если смачивание в обеих трубках произведено так, как выше описано, то при равных диаметрах высота поднятия будет одна и та же. Этим путем чрезвычайно быстро, на глаз, можно отобрать трубки, в надлежащей мере удовлетворяющие условиям равенства диаметров.

§ 72

При избрании трубок, в особенности с большим диаметром, чрезвычайно важно, чтобы стенки трубки, служащие для наблюдения, пред-

ставляли возможную равномерность толщины вдоль по трубке, потому что если равномерности не будет, то стенки трубки будут представлять призму, отклоняющую луч света, идущий из внутренних частей трубки или вверх, или вниз, а потому, наблюдая чрез такую стенку положение мениска ртути, находящейся в трубке, мы не узнаем его истинного положения. Поэтому всякая трубка, назначаемая для точного наблюдения высот ртути, должна быть исследована относительно правильности тех мест трубки, чрез которые производится наблюдение. [1] С противоположной стороны и сбоку могут быть и неправильности в трубке, но с той стороны и в том месте ее, где наблюдается мениск, трубка должна представлять равномерность толщины, чтобы избежать произвольной и сомнительной поправки на уклонение света от преломления в среде, ограниченной непараллельными поверхностями. Этот случай в особенности важен при выборе трубок для барометров и манометров. Выбор трубок в этом отношении и определение тех мест трубки, чрез которые можно и чрез которые нельзя производить наблюдения высот, производился мною следующим образом. Перед трубкою катетометра, в ее фокусе, укреплялась вертикально стеклянная трубка с острым запаянным и вытянутым концом так, чтобы округленная вершина трубки приходилась как раз на неподвижной нити трубы катетометра. Укрепление этой трубки с острым концом производилось мастикою на неподвижной подставке. Диаметр этой укрепленной трубки должен был быть гораздо меньше диаметра исследуемой трубки. Затем исследуемая трубка надвигалась на установленную вышеописанным способом трубку, около нее вращалась как около оси и подвигалась сверху вниз. При этом луч света, идущий от вершины неподвижной трубки, доходил до глаза чрез разные места исследуемой трубки, и если то место, чрез которое проходил свет, представляло параллельность стенок, видимое положение острея неподвижной трубки не изменялось. Если же то место исследуемой трубки, чрез которое проходил свет, представляло неравномерность, то видимое положение конца неподвижной трубки переменялось, и такие места исследуемой трубки отмечались особыми метками. Если в трубке были целые полосы неправильностей, то эти полосы направлялись при устройстве прибора в такую сторону, чрез которую не производилось отчитывания; а для отчета избиралось такое направление, в котором было наиболее правильных мест. Те же места, где были неправильности, заклеивались бумагою или отмечались каким-либо образом с тем, чтобы чрез них не были производимы наблюдения. При предварительном выборе трубки для устройства прибора, простым глазом уже видны были значительные неправильности, так что этим путем выбор облегчается, а описанным приемом достигается легко желаемая точность, необхо-

[1] При самом наблюдении необходимо соблюдение еще того условия, чтобы стенка трубки, сквозь которую производится наблюдение, стояла вертикально. Погрешность от невертикальности будет тем более, чем стенка трубки толще, а потому лучше устранять толстостенные трубки, тем более, что они нередко лопаются и трудно достать такие трубки с параллельными стенками и без пузырей. Термометры с толстыми стенками не годны для точных отчетов.

димая для получения правильных результатов при определении высот ртути в барометрах, манометрах и т. п. приборах.

Если изучаемая трубка длинна, то вышеописанный прием нельзя было применять с успехом; тогда в трубку вводился масштаб, снабженный равно отстоящими и мелкими делениями. Наблюдая расстояние делений чрез стенку трубки, можно открыть в ней места, недостаточно параллельные. Если трубка открыта и очень коротка, то применение масштаба, наблюдая часть его делений чрез воздух, а другую чрез стенки, дает возможность легко убедиться не только в параллельности ст. нок, но и в надлежащем их положении, ибо только тогда расстояние делений, видимых чрез стекло и воздух, остается равным расстоянию делений, видимых чрез воздух.

§ 73

Стеклянные трубки, примененные мною при исследовании упругости газов, были изучены еще по отношению к сопротивлению разрыву при действии давления изнутри. Это было необходимо для безопасности в обращении с манометрами, назначенными для определения высоких давлений. Исследования, сделанные Шевандье и Вертгеймом над механическими свойствами стекла, [1] показали, что предел A упругости при растягивании обыкновенного[2] стекла достигается, когда на квадратный сантиметр сечения действует груз от 77 до 180 килограммов. Известная формула теории упругости показывает, что если давление, определяющее разрыв, есть A, то при действии давления изнутри на трубку, которой наружный диаметр есть R, а внутренний r, разрыв произойдет при давлении $P = 2A\frac{R^2 - r^2}{R^2 + r^2}$. На основании этой формулы, для составления манометра, назначенного для давлений, достигающих 80 атмосфер, я избрал трубки, которых наружный диаметр был 12 мм., а внутренний 6 мм. В самом деле, при $A = 77$, то-есть наименьшему пределу разрыва, найденному Вертгеймом и Шевандье, и полагая $R = 0{,}6$, а $r = 0{,}3$, найдем, что P, то-есть давление, действующее изнутри, при котором произойдет разрыв трубки, будет 92,4 килограммов на квадратный сантиметр, или около 90 атмосфер. Трубки желаемых размеров были заказаны для этой цели на заводе г. Ритинга в Петербурге, причем Ритинг обязался подвергнуть эти трубки столь тщательному закаливанию, какого только возможно достигнуть, и притом сделать трубки из стекла, сколь возможно богатого известью, потому что эти два условия, судя по мемуару Шевандье и Вертгейма, влияют преимущественно на крепость стекла. Когда трубки с завода Ритинга были получены и подвергнуты тщательному выбору относительно равномерности толщины стенок и цилиндричности внутреннего отверстия, я затем счел необходимым подвергнуть их испытанию относительно того давления, которое они могут без-

[1] Annales de chimie et de physique (3) T. XIX.

[2] Свинцовое стекло имеет и меньший коэффициент упругости и меньшее сцепление, чем обыкновенное известковое стекло.

опасно выдерживать. Для испытаний этого рода я применил имеющийся у меня гидравлический насос, которым можно производить давления, достигающие до 300 атмосфер. Для удобства манипуляции, исследуемые трубки были замастичены в особых стальных оправах, как изображено на рис. IV—6, G и F, IV—7 и IV—8. Оправа F при помощи цельной, медной, тянутой трубки E, соединяется с гидравлическим нагнетательным насосом A, при котором находится манометр D. Другая оправа G, в которую вмастичена трубка K, снабжена винтовым запором MN, как видно на рис. IV-8. Устройство подобного запора описано в § 35 (рис. IX-2). Когда трубка замастичена в оправах и соединена с насосом, тогда последний приводится в действие, при открытом запоре MN до тех пор, пока вода не вытеснит всего воздуха, находящегося в трубке. Когда из отверстия a станет выходить вода, тогда запор MN, при помощи ключа H, запирается, то-есть конус запора надавливается на его отверстие, и затем насос опять приводится в действие, причем давление внутри увеличивается, а манометр D показывает давление в атмосферах, достигнутое насосом. При таком расположении опыта разрыв безопасен, наблюдения могут совершаться с надлежащею правильностью и давление увеличивается постепенно, так что осторожно достигается то давление, при котором происходит разрыв. Прилагаемая таблица показывает некоторые из данных, добытых этим путем. В первой графе помещено указание длины трубки в сантиметрах; во 2-й средний наружный диаметр $2R$ трубки, измеренный на разных местах; в 3-й графе внутренний диаметр $2r$, измеренный с того и другого конца трубки; в 4-й дана толщина стенки трубки $(R - r)$; все это в сант.; в 5-й графе дано отношение T между толщиною стенки трубки и ее внешним радиусом [1] $T = \frac{R-r}{R}$; в 6-й графе указано то давление P, выраженное в атмосферах, при котором *по наблюдению* произошел разрыв; наконец в 7-й графе дано сцепление A (килогр. на кв. сантиметр), определенное по давлению, на основании формулы $A = \frac{R^2 + r^2}{2(R^2 - r^2)} P$.

Длина трубки	$2R$	$2r$	$R-r$	$T = \frac{R-r}{R}$	P	A	Замечание о трубка
40	1,24	0,72	0,26	0,42	115	116	с пузырьком
52	1,14	0,41	0,36	0,64	70	45	чистая
31	1,23	0,43	0,40	0,65	80	51	очень чистая
18	1,37	0,60	0,38	0,56	82	61	с пузырьками
32	1,22	0,70	0,26	0,43	108	107	чистая
43	1,24	0,48	0,28	0,45	110	74	совершенно чистая
27	1,28	0,86	0,21	0,33	118	157	с 2-мя пузырьками
31	1,32	0,93	0,20	0,30	116	167	очень чистая.

[1] Величина эта при постоянном сечении определяет сопротивление трубки разрыву. Называя ее чрез T, получим $P = 2AT\frac{2-T}{2-2T+T^2}$. Если T мало, то-есть трубка сравнительно тонкостенна, то можно принять $P = AT(2 + T)$.

Прежде чем обратиться к разбору этих данных, замечу, что ни в способе разрыва, ни в каких-либо других видимых явлениях не замечается никакого различия между слабыми и прочными трубками. Многие опыты с трубками эллиптическими, очень нечистыми, содержащими пузыри, крупинки и т. п. нечистоты, убедили меня в том, что не эллиптичность и не эти нечистоты стекла составляют причину тех крупных различий, которые видны в приведенных выше примерах, хотя подобного рода несовершенства трубок и ослабляют их сопротивление разрыву. Это ослабление особенно значительно только в том случае, когда *внутри* толстостенной трубки есть такая выдающаяся внутрь крупинка, которая образует на внутренней поверхности трубки ясно заметное возвышение.

Явления, сопровождающие разрыв трубок при перевесе давления изнутри, всегда однообразны: если на трубке имеется какая-либо неоднородность, например, пузырек или крупинка, показывающая неоднородность материала в некотором месте, например, несплавившаяся песчинка, или если в некотором месте находится заметная на глаз неравномерность массы, то разрыв всегда происходит по этому опасному месту (употребляя выражение практической механики). Направление разрыва всегда продольное, то-есть трубка разрывается вдоль, а не поперек. Если трубка весьма равномерна, то разрыв происходит во всей ее окружности, так что трубка распадается на ряд палочек, внутри которых находятся тонкие щели, правильно расположенные в виде елки, ветви которой направлены от насоса, то-есть от оправы *F*. Около самых оправ обыкновенно имеется поперечный разрыв неправильного вида, а в самой оправе замастиченная часть трубки остается вполне цельною, неразорванною.

Числа последнего столбца вышеприведенной таблицы показывают, что разрыв испытанных трубок наступал часто при давлениях, несравненно меньших, чем те, каких можно было ожидать; в других же случаях, обратно — трубки выдерживали сравнительно большое давление.

Я полагал первоначально, что такое обстоятельство произошло от недостатков в массе стекла или в его охлаждении, словом в неравномерности материала и в недостатках его состава. Выше упомянуто, что невозможно видеть причину в механических несовершенствах трубок, а для разрешения вопроса в отношении к химическому составу стекла был сделан анализ в нашей лаборатории, под руководством г. Любавина, студентом г. Корбушем. Среднее из нескольких очень сходных анализов дало следующий состав слабых трубок с завода Ритинга, исследованных выше.

SiO^2	Al^2O^3 (Fe^2O^3)	CaO	Na^2O и др.
72,32	1,36	8,61	17,71

Для сравнения привожу, по анализу Сальвета, состав посудного стекла с завода Сирей (Cirey), исследованного Шевандье и Вертгеймом и давшего $A = 142$. [1]

SiO^2	Al^2O^3 (Fe^2O^3)	CaO	Na^2O и др.
73,00	0,30	7,87	18,83

Эти числа показывают, что состав стекла с завода Ритинга обыкновенный и даже лучше крепкого, хорошего посудного стекла, и следовательно не в нем лежит причина наблюденного явления. С другой стороны, равномерность массы, употребленной для трубок, по малому количеству нечистот, с ней находящихся, и отсутствию многих пузырьков, показывает уже достаточную степень проварки стекла, необходимую для надлежащей его равномерности. Дабы составить себе понятие о том, не зависит ли наблюденное явление от недостаточной степени закалки, часть трубок была мною подвергнута закаливанию в печи с возможною последовательностью охлаждения, начиная от темнокалильного жара, а другая часть тех же самых трубок была накалена до яркокрасного каления и затем быстро на воздухе охлаждена. Трубки обоих сортов, единовременно испытанные, оказались почти с совершенно одинаковым сопротивлением относительно разрыва; а именно, наблюдение показало для соответственных трубок, закаленных и не закаленных, следующие давления при разрыве:

Трубки, медленно охлажденные,—от 103 атм. до 87 атм.
Трубки, охлажденные быстро 100 — 80.

Из всех этих соображений и данных явствует, что недостаток в сопротивлении тех трубок, которые имелись в моем распоряжении, не мог объясняться недостатками их материала и приготовления. Так как оказалось, что заготовленные трубки в некоторых случаях не выдерживают давления в 80 атмосфер, то я и не решился употребить их для составления манометра, назначенного до 80 атмосфер, и продолжал свои исследования относительно сопротивления трубок, дабы отыскать такие трубки, которые с уверенностью выдерживали бы давления в составляемом манометре, чтобы не иметь затем повода думать при наблюдениях о возможности разрыва. Для этой цели я собрал весьма большое число разнообразнейших трубок, какие мог только достать в Петербурге и которые своим внешним диаметром подходили к имеющимся оправам при гидравлическом насосе. Так как трубки эти закупались в магазинах и имели разное происхождение, то здесь не могло быть и речи об однородности массы и я желал только испытаниями этого рода найти путь для разъяснения замеченного выше различия вычисленного и наблюденного давления для разрыва трубок Ритинга. На-

[1] В стекле Ритинга больше извести и меньше кремнезема, как я и просил его, делая заказ, основываясь на том выводе Шевандье и Вертгейма, что стекло, не содержащее свинца, приобретает худшие механические свойства, по мере увеличения количества кремнезема и уменьшения количества извести.

блюдения, сделанные над этими случайными трубками, приведены в прилагаемой таблице, в которой даны: 1) отношения $T = \frac{R-r}{R}$, причем R во всех трубках был от 13 до 11 мм.; 2) давление P, при коем произошел разрыв; длина трубок не определялась, ибо все имели длину от 30 до 40 сант., и ее изменения не имели никакого влияния на крепость трубки.

$T = \frac{R-r}{R} =$	0,71	0,70	0,63	0,60	0,57	0,42	0,38	0,32	0,30	0,28	0,25
$P =$	95	108	60	73	65	105	97	120	142	180	125 атм.

В таблице расположены данные по убыли T.

Наблюдения над этими трубками показали, что для всех трубок, у которых толщина стенок меньше трети радиуса, при одном или почти одном внешнем диаметре, сопротивление разрыва больше, чем для трубок со стенками, более толстыми. Переводя эти данные в абсолютные меры, увидим, что для всех трубок, имеющих стенки толще 2 мм., разрыв наступает при давлении, гораздо меньшем, чем для трубок с более тонкими стенками. Однако для взятых мною очень тонкостенных трубок (стенки менее 1 мм.) оказалось, как и можно было ждать, что разрыв наступает при малых давлениях. То же явление, то-есть меньшая крепость толстостенных трубок сравнительно с такими, у коих толщина близка и даже менее 2 мм., видно и в начальных, выше приведенных данных, полученных с трубками Ритинга, хотя все они выбирались преимущественно между толстостенными, в виду того теоретически верного предположения, что при одном и том же внешнем диаметре трубка тем прочнее, чем толще ее стенки. Это предвзятое мнение, вытекающее из учения о сопротивлении материалов, считаемых совершенно однородными во всей своей массе, оказалось неприменимым к толстостенным стеклянным трубкам.

Когда представился такой совершенно неожиданный факт, тогда я испытал те из забракованных трубок Ритинга, которые при желаемом внешнем диаметре имели малую толщину стенок, то-есть значительный внутренний диаметр, — дабы убедиться, не зависит ли наблюденная слабость трубок Ритинга от того же обстоятельства, которое наблюдалось в случайных трубках, то-есть не представляют ли большего сопротивления те трубки, которые имеют малую толщину стенок, сравнительно с теми, у которых стенки представляют значительную толщину. Результаты наблюдения этого рода совершенно оправдали справедливость этого последнего заключения, показав, что трубки того же самого материала, которые при толщине стенок в 3—4 мм. разрывались от давления в 40—80 атмосфер, при толщине стенок в $1\frac{1}{2}$—2 мм. разрывались только при давлении в 100—160 атмосфер.

Итак, исследования, произведенные над сопротивлением трубок разрыву изнутри, показали, что при одном и том же наружном диаметре около 12 мм., трубки с толстыми стенками (более 2 мм.) сопро-

тивляются меньше, чем более тонкостенные (от 2 до $1^1/_2$ мм.) трубки. И теория, и опыт показывают, что весьма тонкостенные трубки при том же наружном диаметре разрываются от гораздо меньшего давления; с увеличением толщины стенок, при том же наружном диаметре, давление, потребное для разрыва, возрастает. Это возрастание давления достигает некоторого *maximum'a* при известной толщине стенок, а затем разрыв происходит при давлении меньшем, чем при наивыгоднейшей толщине стенок. При наружном диаметре в 12 мм., какой был мне необходим, сообразно устройству стальных частей манометра, наибольшее сопротивление разрыву оказали трубки с толщиною стенок от 1,5 до 2 мм. При этой толщине стенок хорошо образованная стеклянная трубка, то-есть равномерная по толщине, представляющая разрез круговой и концентрический, не имеющая пузырьков и крупинок, с уверенностью разрывается не раньше, как при давлении в 120 атмосфер. Что же касается до трубок с наружным диаметром в 12 мм. и с толщиною стенок в 3 мм., какие я первоначально, сообразно теоретической формуле, считал наиболее пригодными для манометра, то ни одна из таких трубок не выдерживала давления в 120 атмосфер, а большинство разрывалось при давлении в 80 атмосфер; некоторые даже при давлении в 40—50 атмосфер. Некоторые трубки толщиною в 1—2 мм. выдерживали давление до 100—150 и даже до 200 атмосфер. Одну из трубок этих размеров я не мог разорвать моим насосом, хотя достиг до давления около 300 атмосфер.

Таким образом, практический результат приведенного исследования состоял в том, что для составления манометра я должен был заменить заготовленные толстостенные трубки более тонкостенными, ибо эти последние выдерживают высшие давления, чем толстостенные. Такие тонкостенные трубки притом представляют и множество других достоинств, важных для той цели, для какой они назначаются; а именно, обработка их пред пламенем паяльного стола весьма легка, их можно нагревать совершенно безопасно, полная равномерность в массе их встречается гораздо чаще, чем в толстостенных трубках; диаметр отверстия при том же наружном диаметре для них больше, чем для толстостенных трубок, а следовательно, капиллярная депрессия и происходящие от нее поправки при них будут меньше, чем при толстостенных трубках; наконец, они находятся готовыми для многих практических подробностей и, следовательно, могут быть всегда добыты, чего нельзя сказать о толстостенных трубках, которые с надлежащею равномерностью массы можно получить только при посредстве особого заказа. От этой последней причины равномерные толстостенные трубки обходятся во много раз дороже тонкостенных. Взятая мною для манометров партия трубок одного приготовления, при диаметре наружном в 11—13 мм., внутреннем от 7 до 9 мм., представляла такую однородность, что из множества сделанных проб ни одна трубка не разорвалась ранее 120 атмосфер давления, да и то было при толщине стенок менее 1,5 мм., или при неравномерности стекла, а большинство рвалось при 150—180 атмосферах давления. Анализ стекла этих трубок, сделанный под руководством г. Любавина студентом г. Бургель-

ским, в среднем из 3-х сходных определений показал содержание:

SiO^2	Fe^2O^3	Al^2O^3	Mn^2O^3	CaO	Na^2O	K^2O
68,23	1,43	1,74	1,26	8,09	14,42	6,15

Хотя здесь меньше извести, чем в стекле Ритинга, но зато меньше кремнезема, а щелочей больше, а потому хорошие качества этого стекла не противоречат выводу Шевандье и Вертгейма.

§ 74

Кроме важного для занимающего меня дела практического результата, вышеприведенные наблюдения представляют теоретический интерес относительно строения стекла и вообще твердых материалов. Дабы объяснить замеченные факты, необходимо принять, что в толстостенных трубках частицы стекла находятся в напряжении гораздо более значительном, чем то, какое имеется в тонкостенных трубках. Возможность существования напряженного расположения частиц в стекле общеизвестна; явления, так называемых, батавских слезок, то-есть капель стекла, быстро охлажденных погружением в воду, с ясностью это доказывают. При выработке стеклянных трубок приходится вытягивать их в мягком состоянии и дожидаться времени, когда после того они приобретут надлежащую степень твердости для того, чтобы можно было конец их отрезать и перенести в калильную печь. В это время происходит с трубкою быстрое охлаждение; наружная поверхность охлаждается гораздо быстрее внутренней, следовательно, когда остыли и правильно расположились наружные частицы трубки, они тем самым мешают уже подвижности внутренних частей, а потому внутренние части, хотя и остывают медленнее, не могут иметь свободного движения, которое нужно для правильного прочного размещения и остаются в напряженном состоянии, потому что долгое время при этом сжимаются чрез вытягивание, ибо оно влечет за собою уменьшение диаметра. Закалка позволяет затем прийти некоторой части напряженных частиц в состояние прочного равновесия, но она не может при значительной толщине стенок сделать это равновесие одинаковым во всей массе от наружной до внутренней поверхности, а потому, при хорошей закалке, на наружной поверхности и около нее вглубь на некоторую глубину должно ждать массы стекла, обладающей прочностью расположения частей, а внутри толстостенной трубки должно ждать остатков натяжения, и чем толще стенки трубки, тем вероятнее существование натяжения внутренних ее слоев.

Эти соображения объясняют вышенаблюденное явление при том допущении, что глубина слоя, в коем частицы стекла пришли в прочное положение, равняется приблизительно от 1,5 до 2 миллиметрам. При таком прочном расположении частей, какое существует в трубках этой толщины, они выдерживают наибольшее давление. При меньшей толщине стенок, трубки становятся слабее по той причине, по которой более тонкая нить рвется от меньшего груза, чем более толстая. При

толщине стенок бóльшей, чем в 2 мм. сопротивление разрыву уменьшается, потому что тогда ему содействуют силы, действующие между напряженными частицами внутреннего слоя.

Непременные следствия такого объяснения состоят в том: 1) что трубки других наружных диаметров должны быть наиболее прочны также при толщине стен, близкой к 2 мм. и 2) что сцепление частиц стекла вдоль трубки (очевидно равномерное) должно быть, несмотря на толщину стен, не менее того, какое наблюдается для трубок с наибольшим сопротивлением разрыву, ибо вдоль трубки условия равновесия однообразны, а не различаются, как при переходе от наружи внутрь. Оба эти следствия оправдались опытом. Трубки с бóльшим и меньшим наружным диаметром, чем вышеисследованные (12 мм.), оказались также наиболее прочными при толщине стен в 1,5 до 2 мм., а при большей толщине стен выдерживали меньшее давление. Что же касается до сцепления вдоль оси трубок, то В. Л. Кирпичев в механической лаборатории Технологического Института сделал с разными трубками ряд определений, показавший, что трубки, взятые мною в последнее время, еще не разрываются (а вытягиваются из оправ) при грузе 175 килограммов на $^1/_2$ кв. сантиметра сечения, поэтому для них должно признать A (стр. 183 [=482]) более, чем $=350$, а потому, если $R = 0{,}6$ и $r = 0{,}4$ сантиметра (таковы мои трубки наилучшего сопротивления), P или давление, рассчитанное на A должно быть $=$ $=$ более 260 атм. Выше было упомянуто, что такие трубки действительно разрываются при давлении от 120 до 160 атмосфер. Приняв среднее $P = 150$, найдем по нему $A = 190$, то-есть сцепление вдоль трубки гораздо значительнее, чем по радиусу.

Чтобы убедиться еще более в справедливости вышеизложенных соображений о строении толстостенных стеклянных трубок, я испытывал относительное состояние наружной и внутренней поверхностей разных стеклянных трубок при помощи твердой стали, например, тонкого сломанного напилка. Если им чертить внутреннюю или наружную поверхности тонкостенной трубки, то черта влечет за собою образование царапины и иногда трещины, распространяющейся немного далее того места, до которого касается напилок. В этом отношении наружная и внутренняя поверхности в тонкостенных (со стенками в 2 и менее мм. толщиною) трубках совершенно одинаковы; в них на обеих поверхностях при опытах того рода, которые я делал, не замечается никакого различия, как и следует быть при вышеизложенном понятии о строении трубок. Совсем иное в трубках толстостенных, то-есть таких, у коих стенки толще 2-х мм. Наружная поверхность этих последних совершенно такова же, как и в тонкостенных, то-есть при царапании напилком наружной поверхности образуется углубление, иногда трещины; но эти последние тогда не распространяются далеко. Если же касаться твердою сталью внутренней поверхности толстостенных трубок и, в особенности, если делать на ней царапины, то при этом образуется трещина поперек всей трубки и притом всегда однообразной формы. Это явление до такой степени резко и явственно, что этим путем легко получать кольца стеклянных трубок, вводя внутрь трубки на-

пилок из твердой стали и производя им круговые царапины. Форма образующейся при этом трещины с трудом может быть описана, но представляет поразительное однообразие во всех исследованных мною трубках, хотя для этого я брал трубки, нарочно заказанные с внешним диаметром около 30 мм., с внутренним около 10 мм. Форма трещины именно есть следующая: от того места, на котором царапина происходит, трещина идет поперек трубки и если к ее оси восставить нормаль в том месте, где началась трещина, то нормаль эта проходит по трещине. Если из центра трубки провести диаметр, перпендикулярный к оси трубки, и в то же время перпендикулярный к той нормали, которая идет от места начала трещины, то диаметр этот проходит чрез внутренний край трещины, а не чрез наружный, то-есть трещина в этом месте заворачивается и представляет уже не прямую плоскость, как вначале, а слабо спиралью изогнутую. Если чрез центр трубки провести диаметр от того места, где началась трещина, до противоположной стороны трубки, то в этом месте трещины нет; она будет выше или ниже, и это зависит от начала того изгиба, о котором говорено выше. Этот изгиб кончается мысообразным схождением трещины с двух сторон, так что образуется клин на одной части трубки и клинообразное углубление на другой части трубки. Форму трещины, получающейся при этом, всякий может наблюдать сам, в особенности на весьма толстостенных трубках. Для правильного образования нормальной трещины необходимо, чтобы трубка была по возможности равномерна. При неправильности формы трубки трещина не имеет правильного вида, и в этом последнем случае вышеупомянутое клинообразное углубление нередко продолжается вдоль всей трубки, и вся трубка представляет тогда сплошную продольную трещину, образовавшуюся от разрыва, начинающегося в месте образования вышеупомянутого клина и происходящего почти моментально после касания внутренней поверхности трубки в одном месте.

Для дальнейшего разъяснения существования в толстостенных трубках того натяжения, о котором выше шла речь, я считал полезным определить с возможною точностью плотность толстостенных трубок в разных слоях. Часть определений этого рода была произведена в моей лаборатории студентом г. Каяндером. Для определений была взята трубка, имеющая наружный диаметр в 30 мм., а внутреннее отверстие в 10 мм., так что толщина стенок равнялась 10 мм. Такую трубку чрезвычайно легко было резать вышеупомянутым способом на кольца. Правильные отрезки, сделанные из этой трубки, выбраны были по возможности без всяких видимых недостатков. Затем два образца были подвергнуты шлифованию так, чтобы удалить наружную поверхность по возможности осторожно, не производя ни значительного разгорячения, ни сильного сотрясения. Для этого шлифование было произведено на наждаковом круге токарного станка в массе воды. Полученные числа показывают, что вся масса трубки представляет плотность немного иную, чем внутренние ее части, а потому наблюдения этого рода в сущности согласны с предположением о существовании натяжения в толстостенных трубках, но число наблюдений и замеченное различие так

невелики, что для дальнейшего подтверждения различия в плотностях необходимы новые опыты, которые, однако, не сделаны, ибо предмет этот, хотя и весьма важный, мог бы отвлечь меня от главных задач, преследуемых ныне мною. Г. Каяндер затем также перешел к другим родам наблюдений, а потому первые определения и не проверены.

Все вышеуказанное убеждает в том, я думаю, неожиданном выводе, что в трубках даже из такого аморфного материала, каково стекло, при некоторой толщине стен существует сильное частичное напряжение, действующее снутри наружу и уменьшающее прочность трубок при перевесе внутреннего давления над наружным. [1]

Вышеприведенные наблюдения над сопротивлением стеклянных трубок разрыву, действующему изнутри, представляют прямой практический интерес в применении к выработке литых пушечных стволов, какие приготовляются из чугуна, бронзы и стали. В металле, как в стекле, должно предполагать существование, после отливки, ковки и охлаждения, натяжения в разных слоях и, как я узнал, ныне производятся уже точные измерения тех натяжений, какие существуют в слоях пушечных металлов. Опыты этого рода обещают дать новый материал относительно строения твердых тел.

[1] В заседании Русского химического общества 13 декабря 1873 г. я сообщил сущность результата по отношению к разрыву стеклянных трубок.

Седьмая глава

О катетометрах и о способах применения их для определения давлений

§ 75

Приборы для возможно точного измерения высот ртутных столбов, примененные в описываемом исследовании, все вышли из мастерской г. Брауэра. Некоторые части этих приборов необходимо описать, потому что при их устройстве я руководствовался отчасти такими требованиями, которые не были прежде сего применяемы, а от них произошли некоторые особенности в расположении частей; поэтому некоторые из моих приборов значительно отличаются от общераспространенных катетометров, применяемых для подобных целей. Вообще катетометры, устраиваемые г. Брауэром, сколько мне известно, нигде не описаны, и так как они сами уже представляют многие особенности, то я и считал необходимым приложить изображение как общего расположения, так и некоторых отдельных частей этих приборов в том самом виде, в котором г. Брауэр выполнил приборы согласно моим требованиям. Таков большой катетометр с 2-мя трубками, представленный на рис. VIII. К этому же разряду приборов, имеющих такое же общее расположение частей, какое обыкновенно делается г. Брауэром, но с изменениями, указанными мною, относится и малый катетометр, представленный на рис. II. Для специальных целей (особенно для малых подразделений градусов и термометров) моих исследований по моим проектам устроены малые формы катетометров, изображенные на рис. IV—I и рис. XIV [1]. При проектировании последнего прибора устранены многие из недостатков обычных катетометров и этот прибор я считаю во всех отношениях наилучшим.

Большие катетометры г. Брауэра характеризуются противу общеупотребительных значительною своею солидностью, которая достигается тем, что тренога катетометра, служащая его опорою, делается из массивной латунной отливки, а центральный стержень и охватывающая трубка катетометра делаются из литой обуховской стали. Эти особенности весьма ценны в катетометрах г. Брауэра. Затем в них та особенность, что вращающаяся наружная трубка не имеет вертикальных рельсов, как это встречается во всех обыкновенных катетометрах. Она оставляется круглою и на ней снаружи прикрепляется зубчатая полоса, служащая для подъема цилиндрического охвата, на котором находится зрительная труба. К стальному цилиндру прикрепляется сверх того винтами медная шкала с серебряной лентой и делениями. Эти особенности катетометров г. Брауэра нельзя считать вполне удачными по той причине, что в выделке совершенно параллельного цилиндра не представляется особых преимуществ пред выделкою возможно параллельных рельсов; а вследствие сочетания стальных и медных

[1] Рис. XIV Менделеев предполагал, повидимому, поместить во второй части своего мемуара. (*Прим. ред.*).

частей прибора являются неудобства, происходящие от неравенства коэффициентов расширения обоих металлов. Зубчатую полосу и шкалу с делениями необходимо прикрепить на стальном цилиндре катетометра, и при разных температурах, конечно, при значительной высоте катетометра будут являться натяжения, вредящие достоинству устройства. Это различие материалов особенно вредно по отношению к медным цилиндрическим охватам, носящим трубу и двигающимся на стальных цилиндрах катетометра; потому что эти охваты должны как можно плотнее прилегать к цилиндру, дабы не было качания при подъеме трубы. Если при некоторой температуре охват и будет довольно совершенным образом прилегать к цилиндру, то при повышении температуры и затем после продолжительного употребления, вследствие стирания медных частей, непременно явится слабость охвата и оттого его качание на цилиндре. На рис. T III—1 изображен общий вид одного из катетометров, находящихся в моем распоряжении. Общая высота его равняется 1350 мм., а шкала имеет 2200 полумиллиметрических делений. На рис. V—1 под лит. *C* представлен (в другом масштабе) вид этого же катетометра сверху. Зубчатая полоса *ab* (рис. VIII—1) находится от наблюдателя слева, а шкала *cd* перед наблюдателем, равно как и нониус, как это видно особенно ясно на рис. VIII—6. Здесь видна головка *G* кремальера, двигающего медный охват вдоль по стальному цилиндру *AB*. Закрепляющий винт *H* находится близ этой головки кремальера и устроен так, что может значительно затруднять или вполне останавливать движение охвата по цилиндру. Нажимая винт *H*, можно достичь того, что при восходящем и при нисходящем движении охвата и трубы они останавливаются тотчас после прекращения действия на головку *G* кремальера. В этом отношении установка труб при наблюдении не оставляет желать ничего лучшего, если кремальер выделан с такою точностью, как это встречается в катетометрах Брауэра. Азимутальное движение стальной трубки *AB* вместе с охватами на центральном стержне достигается при помощи ручек *MN* (рис. VIII-1), когда закрепляющий в азимуте винт *x*, находящийся вблизи ножек H_1, отпущен. Микрометрическое движение в азимуте достигается при помощи известных приспособлений H_2H_3 с винтом и пружиною, какие находятся при астрономических кругах.

В описываемом катетометре, равно как и в малом катетометре (рис. II-3 и 12) имеются на треноге круги и нониусы с делениями, позволяющие определять азимутальные углы, что устроено мною для других потребностей, но что имеет значение и в обыкновенных катетометрических наблюдениях уже по одному тому, что весьма ускоряет и делает более точною установку катетометра и позволяет вводить некоторые из таких поправок, какие без азимутального круга были бы невозможны.

Таким образом, в отношении движений трубы по азимуту и по вертикальной линии в катетометрах г. Брауэра видны значительные отступления от обыкновенных моделей, и если бы устранить вышеуказанный недостаток соединения стали с медью, катетометры г. Брауэра несомненно были бы во всех отношениях лучшего достоинства противу общеупотребительных. Особенными достоинствами в катетометрах

Брауэра отличается однако устройство труб и окулярных при них микрометров. Что касается до закрепления труб и их установки, они ясны из указанных рисунков. Микрометрическое движение для установки оси трубы в горизонтальном направлении производится при помощи винта *J* (рис. VIII—1 и рис. VIII—5). Вращение той площадки, на которой укреплена труба, как видно на рис. VIII—5, происходит по оси, отвечающей оси самого катетометра. Двигающий винт *J* находится с одной стороны этой оси, а с другой стороны действует пружина. Такое устройство микрометрической установки нельзя однако считать вполне совершенным, вследствие того, что винт и пружина действуют на расстояниях, незначительных от оси вращения. Вследствие этого на катетометрах, сделанных для меня г. Брауэром в последнее время, такое микрометрическое движение для горизонтальной установки трубы устраивается подобно тому, как видно на малом катетометре (рис. II—7, 8, 6). Вилки *GG*, на которых лежит труба, укреплены на площадке *F*, вращающейся около оси, закрепление которой на двигающемся охвате видно на рис. II-6. На площадке *F* (рис. II—7) имеются два отростка, в которых находятся микрометрический винт *J* и соответственная ему пружина, как в астрономических трубках. Они действуют на выдающуюся неподвижную часть *C*, составляющую продолжение охвата двигающегося на цилиндре катетометра. Это последнее устройство допускает все возможное совершенство в горизонтальной установке оси трубы. Самые трубы Брауэр делает точеные из цельного металла, дабы не иметь натяжений, свойственных трубам тянутым и паяным. Эти последние влияют на результат наблюдения таким образом, что при переменах температур, вследствие неравенства натяжений, они отчасти изгибаются, и от того направление оси трубы изменяется. Точеная из цельного куска труба у Брауэра выходит прочною, но тяжелою. Притом на объективном конце трубы, противоположном тяжелому микрометру, сделано для противовеса утолщение. Для уравновешения на вертикальной оси всего большого двигающегося груза трубы в катетометрах Брауэра везде применяются противовесы такого рода, чтобы центр тяжести всей двигающейся части совпадал с осью катетометра. Так, на рис. II—3 такой противовес означен буквою *R*, а на рис. VIII—1 буквою *F*. Значительная тяжесть принадлежностей трубы и противовесов принадлежит к недостаткам катетометров Брауэра. Передвижение трубы становится оттого затруднительным. В этом отношении весьма легкие части подвижного состава катетометров Перро представляют модель другой крайности, которую должно избегать более другим механикам, чем устройства Брауэра. В этом последнем преобладает солидность, представляющая важные преимущества, по отношению к точности и неизменности.

Кроме большого катетометра с двумя трубами, изображенного на рис. VIII, при исследованиях употребляется другой подобный же этому катетометр, только с одною трубою и без азимутального круга. Для того большого числа случаев, когда требуется катетометр для измерений небольших высот или небольших их разностей, устроен был малый катетометр, изображенный на рис. II—3 в общем виде, а на рис. 6,

7, 8, 9 и 10 в разных частях, связь которых с общим рисунком II—3 не требует дальнейшего объяснения. Этот малый катетометр представляет прибор с большим числом особенностей, видимых на рисунке. Главнейшую из них составляет способ движения охвата по цилиндру катетометра, потому что здесь для этой цели применен особый микрометрический винт *D*, двигающийся ручкою *E*, и на его головке нанесены деления, позволяющие грубым образом судить о передвижении трубы катетометра. На рис. II—9 очевиден способ вращения этого катетометра. Цилиндр его сплошной, бронзовый и он вращается подобно тому, как вращаются универсальные приборы. Другую особенность этого катетометра составляет то, что он может быть применен для наблюдения в горизонтальном положении цилиндра. Для этой цели применена особая подставка с двумя вилками, в которые вкладываются верхние и нижние части прибора, а именно, углубления *aa* и *bb*. Уставив катетометр обыкновенным способом и поставив трубку его горизонтально, а затем положив катетометр в горизонтальное положение и уставив весь катетометр по особому уровню горизонтально, мы будем иметь трубу катетометра с вертикальною осью, двигающейся по горизонтальной оси. Такое устройство дает возможность пользоваться этим прибором для калибрования, для компарации шкал и т. п. измерений, потому что в таком случае катетометр становится видоизменением обыкновенного компаратора и притом видоизменением более совершенным, чем большинство компараторов, ибо главный их недостаток составляет невозможность в них установить ось зрительной трубы перпендикулярно к горизонтальной оси движения прибора, что здесь достигается с большим удобством и легкостью.

§ 76

Важнейшая особенность Брауэровских катетометров состоит в том, что трубы их снабжаются окулярными микрометрами. Устройство их доведено, в особенности в последнее время, г. Брауэром до совершенства. Головка микрометра *L* (рис. VIII—1) или *K* (рис. II—3) делится на 100 частей, и это дает возможность при значительном увеличении трубы и при небольшом расстоянии объекта с точностью легко измерять малые величины, какие весьма часто составляют важнейшие данные в наблюдениях. В моих микрометрах видны три нити. Одна, центральная, неподвижна, ее легко можно особым винтом центрировать в геометрической оси трубы, а две нити подвижны, двигаются головкою микрометрического винта. Когда желательно употребить в дело микрометр, эти подвижные нити употребляются в дело или обе, или одна. Если приходится устанавливать микрометр на черту шкалы, то необходимо и чрезвычайно полезно применять именно две нити, потому что этим путем достигается гораздо бо́льшая точность, при значительном увеличении, чем тогда, когда одна нить устанавливается против средины черты. Две же нити устанавливаются так, чтобы черта занимала средину между ними. Расстояние между нитями делается именно таким, чтобы при тех увеличениях, какие употребляются в дело и при той толщине делений, какие нанесены на измерительных шкалах,

черта умещалась между нитями, а поверх и снизу ее были видны еще свободные места, вследствие чего установка на черту делается весьма скоро и с большою точностью. Хотя микрометрические винты Брауэровских микрометров почти не представляют мертвого хода, тем не менее, при наблюдениях, установка всегда совершалась в одном данном направлении, чтобы влияние мертвого хода было уничтожено. Дабы иметь возможность применять окулярные микрометры для абсолютных измерений, необходимо предварительно не только определить относительные высоты оборотов винта (которые в микрометрах Брауэра оказываются почти равными), но и абсолютные значения оборотов при данных расстояниях предмета от объектива трубы. Предварительными наблюдениями определяется эмпирическая зависимость между расстоянием объекта и абсолютным значением одного деления микрометра. Так как в большинстве случаев, представлявшихся в нашем исследовании, расстояние между объектом, который состоял чаще всего из столбов ртути, и катетометром было постоянное в течение долгого времени, то для этого расстояния и нужно было знать значение одного деления микрометра, выраженное в делениях шкалы. Но в большинстве других наблюдений расстояние объекта переменное, а потому нужно иметь скорое и легкое средство определять это расстояние. Для этой цели на выдвижной части труб наносятся деления и приставляется индекс, позволяющий узнавать степень выдвижки окуляра. Между расстоянием объекта и выдвижкою окуляра существует определенная зависимость, которая предварительными наблюдениями и должна быть определена, вместе с наблюдениями для определения при этих расстояниях значения делений микрометра. Поэтому впоследствии при наблюдениях нет нужды определять расстояние предмета от объектива, а достаточно только отсчитать по индексу, какому делению отвечает выдвижка окуляра. Это даст тотчас по предварительным наблюдениям значение одного оборота микрометра. Так как этот прием представляет весьма важные практические достоинства, то для ясности дела я привожу вслед за сим описание способа наблюдения и два численных примера определения значения микрометрических оборотов по отношению к расстоянию объекта и к деленцям выдвижки.

Для того чтобы узнать, какое соответствие существует между: 1) расстоянием d ясного видения объекта от объективного стекла, 2) выдвижкою трубы b, то-есть делением, изменяющимся при перемене (необходимой для ясного видения) расстояния объектива от окуляра и 3) числом делений n головки микрометра, отвечающим действительной величине предмета m миллиметров, для этого я и мои ученики употребляли много различных способов. Опишу один, дающий точнейший результат, но требующий линейки, деленной на части, истинное расстояние которых должно быть заранее известно по особой компарации. Изберем на ней две черты на расстоянии m, [1] поставим выдвижку на некоторое деление b, приблизим или удалим линейку на расстояние d

[1] Величину этого расстояния должно избирать сообразно увеличению трубы и расстоянию ясного видения. Во всяком случае m должно быть видимо в поле зрения трубы при всех выдвижках.

до того, чтобы ее деления были совершенно ясно видимы, опустим или поднимем трубу катетометра до того, чтобы центр трубы был в средине между крайними делениями (m) линейки, уставим подвижные нити микрометра на верхнее избранное деление линейки, сделаем на микрометре отчет n_0, переведем подвижные нити на нижнее деление линейки и опять сделаем отчет n_1. Очевидно, что $n = n_0 - n_1$. Отчет положения подвижных нитей микрометра состоит каждый раз из двух величин: числа оборотов и числа сотых их долей. Для счета целых оборотов, в фокусе окуляра укреплена гребенка, зубцы которой дают счет целых оборотов, как можно судить по рис. VIII—3, где A есть упомянутая гребенка, D — подвижные нити (на рисунке ошибочно изображена одна нить), C — неподвижная нить (здесь ошибочно изображено две нити и даже часть третьей). Так как во всех измерениях счет ведется у меня снизу, а изображение, видимое в трубу, обратно, то счет зубцов или целых оборотов ведется сверху. На рисунке видно, что на гребенке против 5-го зубца стоит точка, против 10-го — черта, против 15-го — черта и точка и что положение подвижных нитей на рисунке отвечает 16-му зубцу, то-есть 1600 делениям микрометра. Десятки и единицы отчитываются по делениям головки микрометра, которые нанесены справа налево, дабы соответствовали направлению счета зубцов. [1] Такие же определения повторяют при другой выдвижке и другом расстоянии объекта. Прилагаемые числа получены как среднее из 6-ти определений, сделанных М. Л. Кирпичевым в октябре 1873 года для одной (нижней) из труб большого катетометра при объективе, чаще всего применяемом в исследовании:

Расстояние объекта d	455	422	394	370	353	336	миллиметров
Выдвижка b	0	20	40	60	80	100	(полумиллим.)
Число делений микр.[2] n	781,7	886,4	989,0	1097,3	1195,1	1287,5	на $m=5$ миллим.
Значение 1 деления $\frac{1\,000}{n}$ =	1,279	1,128	1,011	0,911	0,837	0,777	в сотых полумм.

[1] Нуль на головке винта должен отвечать углублению гребенки, что достигается возможностью переставлять деленного тамбура на головке винта. Когда совпадение достигнуто, положение тамбура делается неизменным при помощи особой гайки, видной на рис. II—7 и на рисунке XIV—1,3 [см. прим. на стр. 491. *Ред.*], где a — есть деленный тамбур, b — закрепляющая гайка, c — головка, двигающая винт микрометра, d — индекс. Сверх того ныне самую гребенку я прошу делать подвижною, что и достигается при помощи установочных винтов EE (XIV — 1,3). Это полезно потому, что тогда легко после центрирования неподвижной нити достичь того, что ей отвечает положение = 1000 по отчету микрометра.

[2] Величина одного оборота микрометра не всегда одна и та же. Особые определения показали, что выразив величину оборота от 900 до 1000 (9-ый оборот) чрез 100, мы получим для 5-го оборота 99,7, для 6-го 99,9, для 7-го 100,4, для 8-го 100,3 и т. д. В таблице приведены все числа, исправленные уже на неравенство оборотов;

Зависимость d и n от b с достаточною степенью точности выражается равенствами:

$$1)\ \frac{10}{n}100 = 1{,}2767 - 0{,}007768\,b + 0{,}00002788\,b^2$$

$$2)\ \frac{1\,000}{d} = 2{,}213 + 0{,}0078\,b. \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \text{I}$$

Эти эмпирические формулы совершенно достаточны для практического применения. По ним легко узнать, какое значение имеет один оборот ($n = 100$) винта при той или другой выдвижке и в каком тогда расстоянии находится предмет, что и должно знать. Так по этим формулам при $b = 100$ расстояние объекта 334 мм. (вместо наблюденного 336) и значение одного оборота = 77,9 сотых полумиллиметра или 0,3895 мм., а потому на 1 мм. тогда придется 256,7 делений микрометра (по наблюдениям 257,5). Обычные формулы оптики, [1] приложенные здесь для расчета, дают не более точный результат не только потому, что в них не принята во внимание толщина стекла, здесь при малых фокус-

---

[1] Если f есть главное фокусное расстояние объектива, a — расстояние изображения (нитей микрометра) от объектива при выдвижке = 0, c — абсолютная величина перемещения подвижной нити микрометра при передвижении на 1 деление головки винта, то по этим формулам, выражая все длины в полумиллиметрах:

$b + a = \frac{fd}{d-f}$, откуда $(d-f)(b+a-f) = f^2$; а также: $\frac{n}{m}c = \frac{b+a}{d}$,

откуда $\frac{n}{m}d = \frac{a}{c} + \frac{1}{c}b$.

В практическом отношении должно заметить, что для полного применения этих формул особым препятствием служит то обстоятельство, что d (расстояние от центра объектива) не может быть наблюдаемо с такою точностью, как b, n и m. Исключая из предшествующих формул значение d, получаем последовательно:

$$\left(\frac{b+a}{nc}m - f\right)(b+a-f) = f^2$$

$$\frac{n}{m} = \frac{a-f}{c} + \frac{1}{fc}b, \text{ а потому: } \frac{n}{m} = A + Bb.$$

Следовательно, для выражения зависимости между $\frac{n}{m}$ и b служит линейное уравнение, какое применено во II формуле.

Так как d выражает расстояние не от центра стекла, а от некоторой вне его находящейся части, то к наблюдаемому d должно прибавлять некоторую постоянную g, чтобы получить истинное расстояние. Тогда составляются уравнения:

$$1)\ \frac{n}{m} = \frac{a-f}{fc} + \frac{1}{fc}b \text{ и } 2)\ \frac{m}{n} = \frac{c}{f}(g-f) + \frac{c}{f}d.$$

Эти формулы обыкновенно и применялись мною, а потому сперва отыскивалась эмпирическая линейная зависимость $\frac{n}{m}$ от b, потом $\frac{m}{n}$ от d, а по найденным коэффициентам определяются f, a, g и c. Так во всех микрометрах Брауэра c от 0,00313 до 0,00322. При замене одного объектива другим должно знать только новое f.

ных расстояниях имеющая влияние, но и потому, что ни главное фокусное расстояние объектива, ни истинная величина изображения, ни истинные величины делений выдвижки прямо не известны. Однако, приблизительно приложима формула, выражающая линейную зависимость n от величины b. Действительно из опытов видно, что

$$n = 786.5 + 5{,}06\ b \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \text{II}$$

Сличение вычисленных по I и II величин с наблюденными $\frac{1\,000}{n}$ показывает, что погрешность опыта и расчета не велики:

Выдвижка	$b =$	0	20	40	60	80	100	
Наблюд. величин.	$=$	1,279	1,128	1,011	0,911	0,837	0,777	Сотые полумиллиметра
Вычисленная величина	по I $=$	1,277	1,132	1,011	0,911	0,834	0,779	
	по II $=$	1,272	1,127	1,011	0,917	0,839	0,774	

Те разности между формулами и опытом, которые здесь видны, вероятнее всего, происходят от неверности делений выдвижки. Таблица значений делений микрометра при разных выдвижках, находимая для каждого объектива, не может дать столь точного значения, как прямой опыт, а потому, хотя я и вычисляю для каждого объектива такую таблицу, но пользуюсь ею только в тех случаях, где погрешность в сотых полумиллиметра не имеет значения. Там же, где требуется высшая точность, отдельно каждый раз определяется значение оборота микрометра (чувствительность его) при том самом расстоянии объекта, какой имеется в этом случае, как то будет далее указано.

Другой пример избираю из наблюдений Е. К. Гутковской для малого катетометра, примененного при изучении депрессии ртути:

Расстояние	d	322,5	302,5	287,0	272,0	260,0	миллиметры
Выдвижка	b	0	10	20	30	40	полумиллиметры
Число делений	n	150,9	165,4	180,4	195,8	210,4	для 1-го мм.
Расстояние	d	250,0	240,5	233,0	225,5	219,0	миллиметры
Выдвижка	b	50	60	70	80	90	полумиллиметры
Число делений	n	225,6	240,6	255,0	270,5	284,8	для 1-го мм.

Эти наблюдения хорошо выражаются формулами в миллиметрах:

$$1)\ n = 150{,}4 + 3{,}0\,b; \quad 2)\ \frac{1}{n} = -0{,}00290 + 0{,}0000294\,d,$$

а по ним следует, что гладкое фокусное расстояние $= 106$ мм., что для получения истинного расстояния объекта к d должно прибавлять $+8$ мм., что при выдвижке $= 0$ расстояние изображения $= 156{,}6$ (прямое померение дало 156,5) и что абсолютная величина одного деления микрометра $= 0{,}003131$ мм. [1]

[1] Эти числа отвечают буквам f, g, a и c предшествующей выноски.

§ 77

Что касается до уровней, при помощи которых производится установка, то они в катетометрах Брауэра выполняются со всем возможным совершенством. Они делаются накладными, так что полуцилиндрические ножки уровня кладутся на цилиндрические места труб, служащие для них опорой в вилках охвата. Это особенно ясно видно на рис. II—7, где *GG* представляет вилки, в которых лежат цилиндрические обточенные части трубы, и на эти последние опираются ножки уровня *H*. В устройстве уровней катетометров я старался достичь того, чтобы наблюдатель, глядя в трубу катетометра, мог, не переменяя положения головы, тотчас видеть стояние уровня, потому что, как видно будет из дальнейшего изложения, положение уровня необходимо знать для вывода из показаний катетометра точных измерений. Дабы можно было при наблюдении, не переменяя положения головы, видеть стояние уровня, ему придано такое устройство, представленное в естественную величину на рис. 1—7. Для этой цели в станке *CEC*, окружающем уровень, сделаны по обеим сторонам окошки *DD*, а против них под углом в 45°, в подвижной части *G*, находятся зеркала *mn*. Деления, нарезанные на уровне *MN*, чрез отражение от зеркал, будут видимы наблюдателю чрез окошки *DD*; а при перемене положения пузырька уровня, конец пузырька, по которому производится отчет, будет виден, если подвинуть зеркала при помощи одной из ручек *HJ*, которые к ним прикреплены. Для возможности совершенной установки уровня, Брауэр устраивает уровни так, чтобы для этой цели служили четыре микрометрических винта: *a*, *b*, *c*, *d*. Нажимные винты *c*, *f*, *g*, *h*, служат только для того, чтобы придать уровню, лежащему на концах винтов *a*, *b*, *c*, *d*, совершенно неизменное положение. Эти четыре микрометрических винта *a*, *b*, *c*, *d*, действительно, необходимы для того, чтобы можно было произвести полную выверку уровня в двух отношениях, а именно: 1-е) относительно параллельности его продольной оси с осью вырезок ножек *AB*, которыми уровень ставится на цилиндр трубы, и 2-е) относительно перпендикулярности оси его изгиба к геометрической оси трубы или подставки, на которую кладутся ножки уровня, то-есть относительно, так называемой, его параллельности. Предварительно уровень должен быть выверен в этих обоих отношениях, и при помощи четырех винтов выверка этих обоих родов может быть произведена самим наблюдателем, хотя это дело и принадлежит к числу весьма продолжительных и достигается только мало-по-малу. Затем следует определить меру чувствительности уровня. Для этой цели непосредственно может служить самый катетометр. Уставив миллиметрическую шкалу на некотором значительном расстоянии от катетометра и установив трубу горизонтально, должно отчитать видимое деление, а потом переменить установочным винтом положение оси трубы так, чтобы уровень перешел на *n* делений, опять отсчитать видимое деление и, зная расстояние шкалы от оси движения трубы, по этим данным разочтем, скольким секундам отвечает каждое деление уровня. Никогда не бывает, чтобы уровень представлял одинаковый изгиб всех своих частей, поэтому необходимо

определить чувствительность разных частей уровня. А для того, чтобы в этом, как и в других отчетах не представлялась возможность ошибки, деления на моих уровнях все означены в одну сторону от 0 до 30, а не от средины. Для примера прилагаю таблицу чувствительности уровня той (нижней) трубы катетометра труб, о которой была речь в предыдущем §. Числа, приведенные здесь, показывают, сколько сотых долей полумиллиметра [1] отвечает при данной выдвижке одному делению уровня, когда один конец его пузырька находится при указанном делении уровня:

Выдвижка		0	30	60	90	
Деления уровня	0 — 5	2,0	1,9	1,7	1,7	сотых полумиллиметра
	5 — 10	2,6	2,4	2,2	2,1	
	10 — 15	1,6	1,5	1,4	1,3	

Легко по этим данным узнать, какой дуге отвечает одно деление уровня. Так при выдвижке 0, расстояние объекта от стекла = 455 мм., полудлина трубки равна 124 мм., следовательно расстояние предмета от оси вращения трубы = 579, а при таком расстоянии 1 деление уровня (от 0 до 5) отвечает тангенсу = 0,010 мм., следовательно, соответствует дуге = 3,″6, от 5-го до 10-го деления чувствительного уровня = 4,″6, от 10 до 15 деления каждое отвечает дуге 2,″6.

Должно заметить при этом, что доли делений уровня не могут быть с уверенностью наблюдаемы при столь чувствительных уровнях как те, какими снабжаются мои катетометры, и что в обычных наблюдениях такие различия, какие указаны для разных делений уровня в предшествующей таблице, впадают уже в пределы погрешностей опыта. Так, например, наибольшее различие при выдвижке 0 и при делениях 10—15 и 5—10 отвечает всего 0,005 мм.

Что касается до выверки уровня и вообще до установки катетометров, то я над этим предметом не буду здесь останавливаться с подробностью, потому что при описании нивеллиров и других геодезических и астрономических приборов, а также и многих физических приборов такое описание помещается со всеми необходимыми подробностями. Однако, я не считаю лишним перечислить порядок, которому, по моему мнению, должно следовать для того, чтобы достигнуть установки катетометра в возможно короткое время и с необходимою полнотою. Прежде всего необходимо установить неподвижную нить трубы в соответствие с геометрическою ее осью, то-есть установить нить соответственным винтом так, чтобы при вращении трубы в ее цапфах центральная часть этой нити не переменяла своего положения относительно видимого против нее

[1] Выражения для уровня и микрометра даны в полумиллиметрах по той причине, что самая шкала катетометра разделена на полумиллиметры и нониус ее дает сотые полумиллиметра. Показания нониуса, поправка на уровень и деления микрометра выражаются таким образом в тех же единицах — в сотых полумиллиметра. Это очень полезно для простоты расчетов.

предмета.[1] Затем следует заняться уровнем, то-есть установить его винтами a, b, c, d, правильно, так чтобы при перемене точек опоры для ножек показание уровня не менялось, равно как и при вращении уровня на ножках вправо и влево по оси трубы. Эту установку никогда нельзя считать вполне совершенною; необходимо определить; какое при данном направлении уровня деление его отвечает горизонтальному положению ножек. Когда уровень установлен, тогда при помощи регулирующего винта (J рис. II—7) и одного винта треноги ось трубы устанавливается перпендикулярно к главной оси катетометра. Это узнается по тому, что тогда при перемене азимутального угла на 180° показание уровня остается одинаковым. Наконец, ось катетометра следует поставить вертикально, то-есть достигнуть того, чтобы при всех азимутальных положениях показание уровня было одно и то же, причем необходимо, конечно, действовать теми двумя винтами, находящимися на ножках катетометра, которые не были еще в деле. Для легчайшей установки этого рода полезно хотя на одном из них иметь деления и индекс. После этой установки должно приступить к изучению зависимости между оборотами микрометра и расстоянием объекта или показанием выдвижки и к изучению чувствительности уровня.

§ 78

Для грубых измерений катетометр может служить непосредственно, производя отчет или одною или двумя трубами и исправляя при каждом положении трубы небольшие перемещения горизонтального положения ее при помощи соответственного винта, дабы придать оптической оси трубы всегда истинное горизонтальное положение. Если такое определение производится двумя трубками, что представляет нередко весьма значительные удобства, то предварительными опытами необходимо определить соответственное расстояние обеих трубок, а именно разность расстояний между нулями нониусов и оптическими осями обеих труб. Так, например, в катетометре с двумя трубами, употребляемом мною, из отчета, получаемого с двумя трубами, нужно вычитать 50,98 делений, а именно полумиллиметрических, для того, чтобы знать истинное расстояние из наблюдения показаний нониуса, находящегося при обеих трубах. Можно было бы так устроить нониусы, чтобы отчеты их были и соответственны, то-есть чтобы для обеих труб расстояние между оптическою осью трубы и нулем нониуса было одинаково, но оно в действительности не много меняется, а потому это и бесполезно.

Катетометрические наблюдения в тех случаях, когда требуется значительная точность, должны быть производимы иначе, преимуще-

[1] Необходимо помнить, что при замене одного объектива другим центрирование совершенно пропадает и что обыкновенно при разных выдвижках оно меняется, что зависит от невозможности достичь полного совпадения оси цапф трубы с осью выдвижки. Этот недостаток устранен в новом приборе, устроенном мною (§ 80). Замечу здесь, что перекладной уровень и возможность перекладки и поворота трубы доставляют все средства для точной установки прибора и для определения поправок на нее.

ственно по следующей причине: как бы тщательно ни был выполнен микрометрический винт, устанавливающий трубу, все-таки невозможно достичь каждый раз совершенно одинаковой установки трубы в горизонтальном положении, так что показания уровня при разных наблюдениях не могут быть сделаны совершенно одинаковыми. Если одно деление уровня соответствует 10″, то при расстоянии объекта от катетометра на два метра, разница в уровне на $^1/_2$ деления будет отвечать уже разнице в высотах, равной 0,05 мм. Если объект приближается, то влияние неравенств уровня, конечно уменьшается, но тогда и отчетливость наблюдения возрастает, а потому для тщательных наблюдений должно стремиться приблизить катетометр к наблюдаемому предмету и необходимо ввести поправку на разность стояний уровней при каждом отчете катетометра. В большинстве наблюдений, производившихся мною, расстояние объектива трубы от наблюдаемого предмета было от 30 до 40 сантиметров. При таком расстоянии и при чувствительности уровня в 3″ на одно деление, разница в показаниях уровня на $^1/_2$ деления уже соответствует разнице отчета в 0,003 мм. Поэтому и при столь близком расстоянии необходимо ввести указываемую поправку. Притом, когда производится тщательное наблюдение, не должно после перемещения трубы производить поправки микрометрическим винтом на изменение уровня, потому что, когда производится такая поправка, изменяется расстояние между оптическою осью трубы и нулем нониуса, ибо нониус помещается ближе к наблюдателю, чем ось вращения трубы. Так как после передвижения трубы положение уровня обыкновенно более или менее изменяется, то упоминаемая поправка на положение уровня должна быть непременно производима по отношению к каждому положению трубы.

Эта необходимая поправка, вводимая мною во все катетометрические наблюдения, упускалась, сколько мне известно, другими наблюдателями и потому о ней я считаю необходимым сказать подробнее. На рис. VIII—2 изображен катетометр A и трубка в двух положениях B и C. Когда она два раза установлена оптическою своею осью, то-есть неподвижною нитью, на верхней части менисков E и D, пусть в нижнем положении трубы оптическая ось ее соответствует линии ab, а в верхнем положении линии cd. На рис. изображено, и в действительности всегда бывает, что в двух положениях трубы оптические оси ее не параллельны. Об этом можно судить по показанию уровня. Если при горизонтальном положении трубы один конец пузырька уровня отвечает n_0, то пусть в положении C уровень показывает деление n_1, а в положении D пусть показание уровня будет n_2. Зная чувствительность уровня, по разности n_1-n_0 и n_2-n_0, мы узнаем углы α и β, которые составляет оптическая ось в обоих положениях трубы с горизонтом. Для того, чтобы ввести поправку, необходимо знать соответственное расстояние в обоих положениях трубы. Назовем соответственное расстояние объекта от оси катетометра в верхнем положении чрез d_1, а в нижнем положении чрез d_2. Отчитывая деление, показываемое выдвижкою окуляра при каждом наблюдении и сделав вышеупомянутые наблюдения над соотношением между расстоянием наблюдаемого предмета и делениями выдвижки,

мы будем знать расстояния d_1 и d_2 по отчету выдвижки. Эти данные (а именно: отчет уровня и деления выдвижки в каждом положении трубы) достаточны для того, чтобы найти истинное расстояние наблюдаемых объектов D и E по отчету нониуса в положениях D и C. Пусть отчет нониуса в нижнем положении дает число N_2, а в верхнем положении N_1, разность $N_1 - N_2$, очевидно, не будет представлять разности высот D и E, потому что в обоих положениях оптическая ось не была горизонтальна. Мы найдем искомую разность высот, если найдем, что показывал бы нониус, если бы в обоих положениях оптическая ось была горизонтальна.

Назовем эти искомые отчеты чрез $N_1 + x_1$ и $N_2 + x_2$, то-есть x_1 и x_2 суть поправки, которые должно произвести в отчетах по нониусу, основываясь на показании уровня. В верхнем положении C пусть показание уровня n_1 будет больше n_0, если деления идут от наблюдателя, следовательно, как представляет [1] и рис. VIII—2, оптическая ось лежит выше горизонтальной линии, и если бы она была действительно горизонтальна, то катетометрическую трубу нужно было бы поднять на такое расстояние x_1, на каком при этом положении горизонтальная линия, идущая от трубы, пересекает объект D. Это расстояние x_1 составляет катет треугольника, противулежащий углу α, определяемому по отчету уровня $n_1 - n_0$. Другой катет этого треугольника будет расстояние наблюдаемого предмета от катетометра, которое мы назвали чрез d_1. Следовательно, очевидно, что

$$x_1 = + d_1 \operatorname{tg} \alpha.$$

Так как угол α известен из показания уровня n_1, а d_1 по выдвижке, то следовательно x_1 будет определено. Точно также в нижнем положении B поправка:

$$x_2 = - d_2 \cdot \operatorname{tg} \beta$$

Найденные величины должно прибавить к отчетам N_1 и N_2 и поправленные таким образом отчеты дадут после вычитания истинную разность наблюдаемых высот. В предшествующем расчете применяются углы, показываемые уровнем, а потому необходимо заранее знать чувствительность уровня, выраженную в дугах. Сверх того необходимо соблюдать знаки, как видно из предшествующего примера, а при этом легко могут родиться ошибки, устраняемые при том способе расчета, который я применяю в наблюдениях. Вместо углов прямо могут служить отчеты уровней, причем, всегда вычитая *из наблюденного положения* уровня n_i положение n_0, отвечающее горизонтальному направлению трубы (если, как сказано выше, деления уровня идут от наблюдателя, а не от средины, а если деления шкалы идут снизу), получим прямо поправку x_i со знаком. Она будет положительною, если n_i больше n_0, как в положении C, и отрицательною, если труба имеет положение B. В первом положении C она и должна быть положительною, ибо если бы ось трубы была горизонтальна, трубу должно было бы поднять, чтобы

[1] На рисунке горизонтальные линии представлены пунктиром.

увидеть вершину мениска D, а тогда отчет нониуса был бы больше, то-есть полученный ныне отчет должно увеличить. Расстояние d_i нет нужды знать, если, как это было выше указано (§ 77), предварительными определениями дана прямая зависимость между выдвижкою и чувствительностью уровня, выраженною в линейных мерах. Эта зависимость дается таблицею, предварительно составленною для каждой трубы. Назовем k_i взятое из нее число, показывающее в абсолютных мерах значение одного деления уровня при выдвижке b_i. Очевидно, что $k_i(n_i - n_0)$ есть поправка наблюденного показания нониуса, а потому, если дано показание нониуса N_i, выдвижки b_i, уровня n_i, то, подыскав в таблице k_i, отвечающее b_i, мы получим исправленное показание:

$$N_i + k_i(n_i - n_0).$$

Если, как то и бывает обыкновенно, расстояния верхнего и нижнего концов объекта от катетометра одинаковы, то и b_i в обоих положениях трубы, когда наблюдены отчеты N_1 (нониус вверху) и N_2 (нониус внизу), одинаковы, а следовательно и k_i будет одно и то же. Тогда искомая высота объекта будет после поправки

$$N_1 + k_i(n_1 - n_0) - [N_2 + k_i(n_2 - n_0)] = N_1 - N_2 + k_i(n_1 - n_2). \quad \text{III}$$

Следовательно, для поправки отчета $N_1 - N_2$ нет нужды знать n_0 отчета уровня в горизонтальном положении трубы и нет необходимости приводить трубу в такое положение, а должно только заметить отчеты уровней в обоих положениях трубы, что и облегчается вышеописанным зеркалом (рис. 1—7) при уровне.

Не подлежит никакому сомнению, что катетометрические наблюдения, произведенные без вышеуказанной поправки, не могут иметь той точности, какой можно достичь при ее помощи с данным катетометром, и вследствие того указанная поправка применялась мною во всех наблюдениях. Для примера беру одно из наблюдений, сделанных тою трубою, для которой в § 77 даны значения k_i, для коей $n_0 = 9{,}5$. Наблюдение вверху дало: выдвижка = 47, уровень = 8,2, нониус = 753,47 (полумиллиметров); внизу выдвижка = 47, уровень 11,8, нониус = 324,52. Прямая разность $N_1 - N_2 = 428{,}95$, поправка = 0,019 (8,2—11,8) = = — 0,068, так как по предшествующей таблице k_i для 8—12 делений уровня должно признать средними между данными для 5—10 и 10—15. Замечу при этом, что нередко катетометры Перро снабжаются такими уровнями, коих одно деление = 20″ и даже более и часто наблюдения делают при расстоянии в метр (и более). Тогда, производя установку уровня с точностью каждый раз до $^1/_4$ деления, имеют в высотах от одной этой причины погрешности, доходящие до 0,05 мм.

Вышеприведенная формула III имеет значение только тогда, когда расстояние объекта от трубы в обоих ее положениях одно и то же. К этому необходимо стремиться в точных наблюдениях по той весьма существенной причине, что при изменении расстояния объекта необходимо изменять выдвижку окуляра, а такая перемена сопряжена с но-

вою погрешностью, состоящею в том, что ось цилиндрической выдвижки окуляра никогда вполне не совпадает с геометрическою и оптическою осями трубы. Кроме того, в выдвижке окуляра всегда есть некоторая шаткость, перемещающая положение оптической оси при изменении выдвижки. Вследствие этой последней причины необходимо выдвижку производить всегда в одну сторону, то-есть принять правилом делать всегда наблюдения только после того, когда окуляр удаляется от объектива, потому что при том же расстоянии окуляра от объектива, при их сближении и удалении положение выдвижки не остается одним и тем же, но немного изменяется. Я вводил в некоторые наблюдения поправку на наклонность оси выдвижки к оптической оси трубы, но гораздо лучше совершенно избежать перемены расстояний между окуляром и объективом при верхнем и нижнем положениях трубы, потому что тотчас указанная поправка не дает вполне согласных результатов.

§ 79

Невозможность устранения некоторых обстоятельств, производящих неточность в катетометрических наблюдениях, принудили меня прибегнуть, с одной стороны, к способу компарации, устраняющему важнейшие недостатки прямого катетометрического наблюдения, а с другой стороны к устройству таких приборов для наблюдения высот, в которых бы, по самому существу дела, были устранены некоторые из недостатков, свойственных обычным катетометрам. Большинство произведенных мною наблюдений именно и сделано было при помощи способа компарации и с приборами, устраняющими главные недостатки, обычные катетометрам.

Способ компарации состоит в том, что отчет производится без помощи шкалы катетометра, а по особой шкале, поставленной рядом с измеряемым предметом на таком же расстоянии от катетометра, на каком находится и этот последний. При этом вовсе не нужно иметь делений на катетометре, и это обстоятельство весьма большой важности, потому что деления на шкале катетометров, как бы тщательно они ни были сделаны, страдают существенным недостатком вследствие того, что температуру шкалы мы не знаем. Наблюдатель находится столь близко к шкале катетометра, что от этой одной близости шкала катетометра постоянно меняет свою температуру и эта температура весьма неодинакова в разных частях шкалы. В этом я убедился при помощи того, что близ шкалы катетометра вделал небольшие термометры, сравненные между собою, и заметил, что весьма быстро совершаются перемены, достигающие двух, трех и даже пяти градусов Цельзия. Так как шкала прилегает к большой металлической массе катетометра, то нет никакого критерия для определения температуры шкалы в разных ее частях. Если только допустить, что в температуре латунной шкалы мы делаем погрешность в 2°, то при высоте в 1 метр эта разность доставляет уже около 0,04 мм. разности, а потому какие бы мы поправки ни вводили в катетометрические наблюдения, они будут представлять разность, достигающую до этой величины по одной причине: неравномерности и

неизвестности температуры. Этого существенного недостатка вовсе нет в том случае, когда шкала, по которой производится измерение, находится вдали от наблюдателя, как и самый предмет. Пропуская же чрез эту мерительную шкалу струю воды, как о том упомянуто в § 11, стр. 20 [=263], мы можем с полною уверенностью производить точную поправку натемпературу шкалы.

Кроме того, прямой отчет по шкале катетометра представляет еще тот существенный недостаток, что вертикальное расстояние между нулем нониуса и оптическою осью есть величина переменная при разных положениях трубы и при разных температурах тех металлических частей, которые соединяют трубу с нониусом. Достаточно взглянуть на рис. VIII—4, где в утрированном виде изображено косое положение движущейся части катетометра (когда оптическая ось находится в a, вместо того, чтобы быть в b), чтобы видеть, о каком недостатке идет в настоящее время речь. Когда катетометрическая трубка перемещается, нет никакого указания на то, что изображенного изменения в положении оптической оси не совершается, ибо при таком изменении в положении оптической оси, уровень может оставаться совершенно неподвижным. Для убеждения же в существовании изображенного на рис. VIII —4 перемещения, я укреплял на подвижную часть катетометра уровень перпендикулярно оптической оси трубы, и при движении ее оказывались значительные перемещения в этом уровне. В катетометре, описываемом далее, этот недостаток устранен, а в способе компарации он не имеет никакого значения, потому что при этом последнем способе катетометрическая труба есть только способ нивеллирования наблюдаемого предмета по отношению к шкале, рядом с ним стоящей. А потому только одно свойство требуется от катетометра при способе компараций: вертикальная ось его должна быть перпендикулярна, а при небольшом угле вращения перпендикулярная установка этой оси должна быть настолько совершенна, чтобы погрешность, вкрадывающаяся от неперпендикулярности этой оси, была меньше других неизбежных погрешностей отчета. Если при употреблении способа компарации расстояние шкалы и объекта от вертикальной оси одно и то же, чего и должно стремиться достичь со всевозможным совершенством при установке прибора, то негоризонтальность оптической оси трубы не имеет никакого влияния на результат компарации. Тогда имеет влияние только одно обстоятельство, а именно одинаковость показаний уровня при направлении трубы на объект и на шкалу, а это и будет всегда в том случае, когда ось вращения катетометра перпендикулярна. В действительности полной перпендикулярности достичь конечно нельзя, а потому должно и при употреблении способа компарации производить наблюдения над положением уровня и делать поправку наблюдаемого отчета на изменение уровня по тому самому способу, который указан в предшествующем параграфе. Назовем чрез n_1 показание уровня, когда труба направлена на объект, и чрез n_2, когда она обращена на шкалу, и предположим, что расстояние объекта и шкалы от трубы одно и то же. Поправка будет зависеть от того, что наклон трубы к горизонту при наблюдении на шкале иной, чем при наблюдении объекта, и будет со-

стоять в произведении расстояния на тангенс угла уклонения трубы или в произведении $(n_1 - n_2)\, k_i$, где значение k_i то же, что и в § 78. Преимущество способа компарации состоит в том именно, что азимутальные движения катетометра правильны, и легко так установить катетометр, чтобы при азимутальном вращении трубы уровень почти не изменялся, а потому $n_1 - n_2$ можно легко сделать $= 0$ или очень близким к нему. Совершенно иное при вертикальной перемене места трубы, как в обычных катетометрических определениях. Там невозможно достичь, особенно при некоторой высоте поднятия, чтобы при перемещении трубы сверху вниз не было перемещений уровня, ибо движение по прямой линии технически нельзя выполнить с тем совершенством, с каким достигается круговое движение.

Так как шкала, поставленная около предмета, может быть снабжена только некоторыми, например, миллиметрическими делениями, то очевидно, что доли этих делений могут быть получаемы только при помощи окулярного микрометра, которым снабжены трубы катетометра. Для этой цели наблюдение располагается следующим образом: сперва катетометр устанавливается так, чтобы вертикальная его ось была по возможности перпендикулярна, затем когда труба находится почти в горизонтальном положении, наводится на наблюдаемый предмет неподвижная нить трубы, в этом положении труба закрепляется и производится отчет уровня. Затем катетометр поворачивается на шкалу и подвижная нить шкалы устанавливается на ближайшее *нижнее* деление шкалы. Пусть при этом показание микрометра будет m_1, а когда подвижные нити микрометра установлены на неподвижную нить, пусть показание микрометра будет m_0, разность $m_0 - m_1$ покажет расстояние объекта от ближайшего деления шкалы, и оно переведется в миллиметры, если известна выдвижка и соответственное ей значение одного оборота микрометра. Однако еще гораздо точнее поступать так. После отчетов m_1 и m_0 должно сделать отчет m_2, уставив подвижные нити на ближайшее верхнее деление шкалы. Тогда $m_2 - m_1$ даст число делений микрометра, отвечающее одному делению шкалы, $\frac{m_0 - m_1}{m_2 - m_1}$ покажет расстояние объекта от черты m_1. Чтобы при этом не сделать ошибки в расчете, должно у шкалы 0 ставить внизу, а в микрометре вести счет сверху (вследствие обратности изображения, см. § 76), а в записи означать, какому делению шкалы отвечает m_1. Например, запись должно вести так: $73 = 973{,}3$; $74 = 1241{,}9$, объект $= 1021{,}2$. Это значит, что при направлении на 73 деление шкалы отчет микрометра был $973{,}3 = m_1$, при направлении подвижных нитей на 74 деление он был $m_2 = 1241{,}9$, а при направлении на неподвижные нити $m_0 = 1021{,}2$. Из этого следует, что объект отвечает $73 + \frac{1021{,}2 - 973{,}3}{1241{,}9 - 973{,}3} = 73{,}178$ делению шкалы. При этом способе записи затрудняются ошибки расчета, а наблюдения быстры и достигают возможной точности.

После того как сделано наблюдение в одном положении трубы, труба переводится в другое положение и там повторяется то же са-

мое.[1] Разность обоих отчетов по шкале вместе с отчетами по микрометру даст, по исправлении на показание уровня, расстояние наблюдаемых предметов. Дело наблюдения при способе компараций облегчается весьма значительно при употреблении катетометра с двумя трубами, потому что при этом избегается передвижение трубы и наблюдение производится единовременно вверху и внизу, и кроме того, достигается еще и та важная выгода, что спустя некоторое время можно легко убедиться в том, что измеряемая высота не подверглась какому-либо изменению или со шкалою не произошло какого-нибудь перемещения. Точность, которой можно достичь способом компарации при помощи катетометров такого устройства, какими я обладаю ныне, и при малом расстоянии объекта от 25 до 40 сантиметров, действительно, весьма значительна и вероятную погрешность наблюдения нельзя считать более 0,005 мм., как видно из множества примеров, в которых вышеприведенный способ компарации употреблен для многократного сличения нормальных моих метров со шкалами, подлежащими изучению. Так как разность длин двух моих нормальных мер была ранее несколько раз точно определена (способы описаны будут в особой главе), то по этой разности и по согласию отдельных определений, многократно повторенных, можно было вывести суждение о степени точности приема. При этом, конечно, было необходимо делать поправку на температуру шкал и метров.

Так как при компарации нет нужды в катетометрической шкале, то можно употреблять в этом случае трубы, снабженные окулярными микрометрами и уровнем и устроенные подобно нивеллирным трубам, то-есть с возможностью горизонтальной установки. Подобную отчетную трубу по моему проекту устроил г. Брауэр преимущественно для отчитывания термометров и для подразделения нанесенных на них делений градуса на более мелкие части. Объектив этой трубы позволяет делать наблюдения на расстояниях, начиная от 20 сантиметров, притом увеличение достигает до 40 раз; и так как такая труба представляет инструмент, могущий служить для множества случаев точного измерения, то она и изображена на рис. IV-1 и 2. При устройстве этой трубы я желал иметь еще и то удобство, чтобы она заменяла обыкновенную отчетную трубу, имеющую вращение на горизонтальных цапфах. Поэтому, как видно на рис. IV-2, на трубе MN имеются четыре цапфы, а именно, кроме тех Q, в которых труба положена, еще две цапфы OO в перпендикулярном направлении. Вместилища для цапф K и L находятся на таком же расстоянии, как и самые цапфы OO, а потому труба может быть положена в те же гнезда K, L этими последними цапфами и тогда будет иметь вращение, как обыкновенная отчетная труба. В том положении трубы, которое изображено на рис. IV-1, она представляет нивеллир с уровнем R, могущим определять горизонтальность геометрической, а следовательно, по обыкновенному способу, и оп-

[1] Это возможно только в редких случаях, потому что во время передвижения трубы и установки ее наверху объект может измениться, а потому для компарации, строго говоря, нужны или два прибора, или по крайней мере прибор с двумя трубами.

тической оси трубы. Труба снабжена сверх того выдвижкою h и окулярным микрометром P. Вся труба вместе со всею подставкою GH может при помощи кремальера F подыматься и опускаться, что необходимо для установки неподвижной нити трубы на визируемый предмет. Кроме того, ось прибора C, а следовательно и ось трубы, имеет полное азимутальное движение, в котором она может быть закреплена нажимным винтом D и перемещаема микрометрически при помощи винта E. Для установки служит тренога AB.[1] Во всяком случае этот прибор в том виде, в каком был доставлен Брауэром, представляет несомненно такие же достоинства, как и лучший катетометр в применении к способу компарации. Две такие трубы могут служить для точнейших измерений высот по способу компарации, и так как прибор этот по легкости своей переносен и с ним легко обращаться, притом он может служить для множества других целей, как обыкновенная отчетная труба, и так как он гораздо дешевле катетометра, то такого рода снаряды нельзя не рекомендовать для наблюдателей, занимающихся точными измерениями.

§ 80

Хотя описанная выше отчетная труба и представляет многие достоинства, но ею непосредственно нельзя измерять высот, что требуется для многих наблюдений, где нет необходимости в большой точности, а потому я проектировал затем устройство таких небольших катетометров, которые были бы снабжены шкалою для непосредственного измерения небольших высот, но в которых не было бы некоторых недостатков, свойственных обыкновенным катетометрам. Такой малый катетометр, исполненный сообразно моим указаниям г. Брауэром, изображен в конструкторских чертежах на рис. XIV.[2]

Два таких катетометра вместе с мерительною шкалою назначаются для компарации и, следовательно, в этом случае шкалы, которыми они снабжены, не имеют никакого применения. Употребление двух отдельных небольших катетометров в способе компарации представляет существенную выгоду. В самом деле, сколь бы совершенно ни было механическое выполнение одного большого катетометра, во всяком случае нельзя достичь при выполнении совершенной параллельности между вертикальною осью вращения катетометра и производящею цилиндра, служащего для движения трубы по вертикальной линии. По этой последней причине, если труба перемещается вверх по катетометру, показание уровня значительно меняется, и если катетометр будет установлен так, чтобы ось вращения его была вертикальна, когда труба находится внизу, то при перемещении трубы вверх, это условие уже не будет для него выполнено. Гораздо совершеннее можно достичь параллельности между вертикальною осью вращения и производящею, по которой двигается труба, если эта последняя имеет небольшую

[1] Сверх того для установки оси цапф перпендикулярно вертикальной оси есть в вилке L особый винт, медленно изменяющий наклон трубы к вертикальной оси. Этот винт не изображен на рисунке.

[2] См. прим. на стр. 491.

длину. Если на катетометре есть две трубы, то уставив его по нижней трубе, мы не будем иметь надлежащей установки его по отношению к верхней трубе. Если же имеются два отдельных малых катетометра, то в вертикальном отношении каждый из них можно уставить с гораздо бóльшим совершенством.

Существенные изменения, которые представляет мой малый катетометр, изображенный на рис. XIV, состоят в устранении выдвижки, в замене цилиндра предшествовавших катетометров рельсами, в устранении противовесов, делающих весь подвижной состав катетометра тяжелым, в надлежащем расположении нониуса и шкалы и в применении подвесного, перекладного уровня с зеркалом. Главною целью этих изменений было достижение точности в методе компарации в том часто встречающемся случае,[1] когда объект и шкала находятся не на одинаковом от катетометра расстоянии. Тогда в обычных катетометрах надо изменять выдвижку, чтобы сделать отчет ясным, а лишь только выдвижка изменяется, получаются поводы к двум погрешностям. Главную составляет изменение положения оптического центра трубы, а вторую: настоятельная необходимость точно знать тогда положение оптической оси трубы (по отчету микрометра) в обоих положениях выдвижки, без чего отчет не даст истинного значения расстояний при компарации, а такое знание при равенстве расстояний не требуется (см. § 78 и 79), а добыть его для каждого положения трубы почти невозможно, и во всяком случае очень хлопотливо. Эта необходимость станет очевидною каждому, кто графически представит себе (подобно тому, как изображен рис. VIII 2) объект и шкалу на разных расстояниях от катетометра и кто сделает следующее прямое наблюдение с наилучшим катетометром обычного устройства (с переменою расстояния объектива от окуляра, то-есть с выдвижкою). Установим с возможною точностью неподвижную нить в оси трубы и наведем ее на один мениск ртути в широкой U-образной трубке. Переведем теперь трубу на другой мениск. Если он стоит в том же расстоянии от катетометра как первый (и выдвижка не изменена), то будет отвечать нити. Если же придется изменить выдвижку, то не будет совпадения, хотя бы уровень и не показывал изменения. Совпадения не будет и тогда, когда без перемены выдвижки можно видеть оба мениска, если центральная нить не движется весьма точно на горизонтальной плоскости (а это может зависеть или от того, что труба не стоит горизонтально, или от того, что нить не находится в центре трубы), потому что глаз может довольно ясно видеть предметы, находящиеся на разном расстоянии. И чем оно абсолютно и относительно больше, тем больше будет упомянутое неравенство. Эти соображения и опыты заставили меня в применениях обычных приборов: 1) так располагать все наблюдения, чтобы

[1] Такой случай представился, например, в моем способе определения давлений по сумме высот нескольких столбов ртути. Невозможно с полною точностью установить несколько трубок, неподвижно скрепленных между собою, и шкалу совершенно в одном расстоянии от оси вращения катетометра, хотя одну трубку можно легко и точно установить на такое расстояние от катетометра, в каком находится шкала.

выдвижку не менять, и 2) устанавливать точно центрирование при данном положении выдвижки, а затем, естественно, привели к устройству прибора, в котором расстояние (и относительное положение) окуляра от объектива не меняется.

Выше был уже объяснен недостаток, свойственный выдвижке, а именно то обстоятельство, что при выдвигании окуляра изменяется, хотя и незначительно, при совершенстве выполнения, положение оптической оси. Если совершенно уничтожить выдвижку, то-есть устроить трубу с неизменным расстоянием окуляра от объектива, этот недостаток совершенно уничтожится. Тогда можно раз навсегда уставить неподвижную нить в геометрическом центре трубы и, следовательно, тогда можно с точностью судить по этой последней нити и по уровню о горизонтальном направлении луча зрения, чего нельзя с такою точностью никогда сделать в том случае, когда окуляр, а следовательно и неподвижная нить его меняют свое место. При отсутствии выдвижки, то есть при неизменности расстояния между объективом и окуляром, установка объекта на расстоянии ясного видения представлялась бы весьма затруднительною, если бы нельзя было перемещать самой трубы. Грубую установку на приблизительное расстояние ясного видения можно произвести, перемещая катетометр, что в описываемом катетометре достигается легко вследствие его малого веса. Затем катетометр устанавливается по обыкновенному способу так, чтобы ось вращения была вертикальна, и тогда окончательная установка для ясного видения достигается при помощи передвижения самой трубы в цапфах. Для этого труба снабжена зубчатою полосою MN и кремальером Q, допускающими возможность изменения расстояния объектива от наблюдаемого предмета до тех пор, пока этот последний будет виден с надлежащею ясностью.

При неизменности расстояния объектива от окуляра, а следовательно и предмета от объектива, достигается еще та существенная выгода, что тогда значение одного деления уровня остается постоянным по отношению к измеряемому предмету, а также и значение одного оборота микрометра, которым снабжен окуляр трубы. Мы видели выше, что при точных измерениях необходимо вводить в наблюдаемые отчеты поправку на уровень и на значения одного оборота окулярного микрометра, а эти последние изменяются с расстоянием. Здесь это расстояние постоянное, а следовательно, потребные для поправки коэффициенты всегда остаются одни и те же; поэтому их можно найти со всею надлежащею точностью, и чрез введение их не взойдет никакой новой погрешности, если предварительно наблюдения для нахождения этих коэффициентов, относящихся к микрометру и уровню, будут сделаны со всеми надлежащими предосторожностями. Такого рода наблюдения чрезвычайно легки, а именно, катетометр устанавливается в вертикальном положении и на расстоянии ясного видения укрепляется шкала с мелкими делениями. Перемещая затем уклон трубы, легко можно определить значение одного деления уровня непосредственно в делениях шкалы, то-есть в измеряемых величинах. Точно также при этом легко определить значение каждого оборота микро-

метра и выразить их в тех же самых долях, какими выражено изменение уровня. Опыт показывает мне, что в скорых, и в то же время точных компарационных измерениях такие трубы, в которых расстояние объектива от окуляра, как в описываемом катетометре, остается всегда неизменным, дают результат, при прочих равных условиях, по крайней мере в три раза более точный, чем лучшие катетометры с трубками, имеющими выдвижку.

Уровень в описываемом приборе перекладной и подвешивается на трубе снизу. Такое расположение не препятствует видеть объект поверх трубы, что значительно ускоряет установку. Для отчитывания уровня служит зеркальце n (под 45°), скользящее на подножке уровня. Для прохождения света от него вырезано окошко *mm* в подвеске уровня. Выполнение цилиндра труб так совершенно, что при движении всей трубы в охватах (при помощи вышеописанного кремальера Q) не замечается большей перемены в уровне как на 0,5 деления, что отвечает, при расстоянии объекта на 600 мм. (таков один из объектов), 0,004 мм. На такое и др. роды перемещений уровня конечно должно и возможно еще производить поправку, особенно при больших увеличениях. Замечу, что длина всей трубы = 290 мм., а расстояние изображения от объектива = 270 мм. Длина зубчатки на трубе = 75 мм., да она затем еще может двигаться в оправах, что необходимо для центрирования неподвижной нити. Для трех объективов, которыми снабжены мои трубы, расстояния объектов суть: 350, 610 и 950 мм. Два окуляра позволяют изменять увеличение соответственно степени освещения и др. обстоятельствам.

Заменою в описываемом катетометре тех вертикальных цилиндров, по которым двигается охват с трубою, рельсами, подобными тем, какие издавна употребляются для устройства катетометров, я желал достичь двоякой цели: во-первых, облегчения всего катетометра, а во-вторых, возможности регулировать особыми нажимными винтами (с пружиною) надлежащую плавность движения трубы вверх и вниз, что необходимо, как при изменении температур (вследствие неполного равенства коэффициентов расширения рельсов и охвата), так и при долговременном употреблении катетометра, вследствие стирания рельсов. При устройстве описываемого катетометра, как видно из рис. XIV—2, избегнуты противовесы при помощи того, что рельсы помещены не прямо над вертикальною осью вращения катетометра, но несколько сбоку, дабы центр тяжести трубы приходился почти прямо, над вертикальною осью вращения. При малости размеров всего катетометра (как видно по рисунку) этого легко было достичь, потому что и без большой как то бывает в обыкновенных катетометрах, центральной оси вращения, а при большой опорной плоскости *CD*, азимутальное движение катетометра чрезвычайно плавно и не представило в устройстве никакого затруднения. Высота всего прибора = 360 мм.

В катетометрах всегда желательно, чтобы шкала была расположена как можно ближе к трубе и по возможности на продолжении той горизонтальной оси, по которой вращается труба, потому что тогда при уклоне трубы произойдет наименьшее изменение расстояния между

оптическою осью и соответственным делением шкалы. Для этой же последней цели нуль нониуса должен быть близок к той горизонтальной плоскости, в которой находится оптическая ось трубы. Эти условия выполнены в описываемом малом катетометре. Вследствие совокупности перечисленных изменений в устройстве катетометра, описываемый прибор доставляет результат гораздо более точный, чем обыкновенные катетометры не только при способе компараций, но и при непосредственном измерении катетометрическою шкалою. Что касается до других подробностей устройства малого катетометра, то они явственны из рис., например, поступательное движение вверх достигается кремальером R и зубчатою полосою. Винтом S может производиться закрепление подвижной части катетометра. На головках винтов треноги полезно было бы сделать деления, чрезвычайно ускоряющие установку катетометра, и на самом верху катетометра должно было бы помещать круглый уровень, дабы иметь возможность достигнуть первой, приблизительной установки со всею желаемою быстротою.

В описываемых катетометрах расстояние наблюдаемого предмета от объектива было в большинстве наблюдений около 61 сантиметра, а потому, вследствие возможности перемещения трубы на 7 см., расстояние объектов от вертикальной оси прибора могло изменяться от 76 до 83 см. При этом расстоянии 1 деление микрометра отвечает около 0,007 мм., и одно деление уровня около 0,013 мм.

§ 81

Употребляя при наблюдениях трубами значительные увеличения, необходимые для достижения точности отчета, весьма важно применять надлежащие средства для освещения измеряемого предмета, будет ли это шкала с делениями или верхняя часть ртутного мениска, или же какой-либо другой предмет. Установка ширмы, бросающей свет на шкалу, или светящейся лампы или же собирательного стекла требует большой внимательности, в особенности в тех случаях, когда нарезки глубоки. Тогда при косо падающих лучах света одна сторона углубления может освещаться более другой и нити трубы наводятся неточным образом на середину нарезки. В таком случае необходимо, чтобы лучи падали как раз перпендикулярно длине шкалы и равномерно освещали бы обе стороны углубления нарезок. Так как это последнее условие достигается с трудом, то вообще глубоких нарезок должно избегать. Притом они при значительных увеличениях представляют объект, весьма неудобный для точного измерения. При тех увеличениях и расстояниях объекта, которые применялись мною, наилучший результат представляли такие шкалы, в которых нарезки почти не видны простым глазом, что зависит от их небольшой глубины, а ширина таких нарезок не превосходит 0,007 мм. Такие черты, сделанные алмазом на стекле, представляют совершенную ясность отчета, но требуют однако весьма правильно направленного освещения. При этом весьма важную помощь оказывают вспомогательные ширмы из белой бумаги или матового стекла, помещенные в надлежащем положении по отношению

к шкале и источнику света. Они устраняют посторонний свет и уменьшают блеск поверхности шкалы.

Известно, что при сколько-либо широких трубках определение в них положения самой верхней части (касательной), освещенного с той стороны, с которой находится наблюдатель, совершенно невозможно, потому что при рассмотрении мениска трубою в нескольких местах заметны резкие, светлые и темные полосы, представляющие отражение различных предметов, в особенности переплетов окна. Верхняя часть мениска при этом весьма неясно видна, и различного рода ширмы и другие приспособления, как-то: бумага с темными и белыми полосами и т. п., оказываются весьма мало помогающими не только резкости отчета, но даже уверенности в том, что видимый предмет есть действительно верхняя часть мениска. Наиболее чувствительно такое затруднение в трубках столь значительной ширины, в которых верхняя часть мениска представляется уже вполне плоскою, а именно в трубках, начиная от 20 мм. в диаметре. Испытав различные приемы, предложенные другими исследователями, для ясности отчета менисков, я остановился на способе определения при помощи отражения острия, и еще на одном способе, применявшемся уже в прежнее время наблюдателями, но ныне неизвестно по какой причине оставленном. Он состоит в том, что позади трубки со ртутью помещается небольшой светящийся предмет, притом в таком положении, чтобы по бокам мениска и поверх его могли проходить только лучи от верхней части светящегося предмета, например, от шара лампы или от параболического зеркала, в фокусе которого поставлена свеча.[1] На рис. VIII -2 изображен этот способ освещения мениска D лампою F, находящеюся при этом в столь значительном расстоянии от столбов ртути, чтобы нагревание было как можно более ограничено. Однако несравненно лучше в этом отношении употребление свечи в параболическом зеркале, окруженной со всех сторон двойными стеклянными цилиндрическими стенками. Между этими последними наливается вода и ею удерживается столь много лучей тепла, что заметного изменения температуры при освещении тогда не бывает. Такой способ освещения мениска основывается на весьма простом соображении. Мениск ртути не прозрачен, а потому тогда он рисуется в виде черного с резкими контурами изображения на ярко освещенном поле. Необходимо при этом способе освещения соблюдение одного существенного условия: источник света надо постепенно понижать, наведя нить на верхнюю часть мениска. При этом, если установка неверна, это будет тотчас заметно, потому что при понижении источника света лучи будут падать все более и более снизу, следовательно, верхняя часть мениска будет все менее и менее освещена. Если же источник света находится выше мениска, тогда можно вдаться в ошибку, потому что легко принять освещенный сверху край мениска, лежащий по ту сторону, которая обращена к наблюдателю, за верхнюю

[1] Для того, чтобы источник света не давал лучей тепла, я устроил фонарь, окруженный водою, какой изображен на рис. X—3. Во всяком случае полезно загораживать лампу ширмою с отверстием для прохода надлежащего количества света.

точку мениска, ибо эта освещенная часть мениска отражает много лучей света и кажется освещенным краем, переходящим в черное очертание непрозрачного мениска. Если будет такой случай при неправильном положении света, при понижении источника света будет ясно заметно, что кажущаяся верхняя часть мениска переменяет свое положение.

При весьма небольшом навыке, с применением этого приема достигается совершенная уверенность в точности результата, но особенно возрастает она в том случае, когда над верхнею частью мениска имеется, сверх того острее, помещенное в средине трубы, как это изображено на рис. VIII—2 под буквою *E*. Устройство такого острия, употреблявшегося мною в манометрических трубках, изображено на рис. VI—3. Здесь *AB* есть стальная насадка, снабженная отверстиями *aa* и боковыми трубками *b* и *b*, назначенными для сообщения манометра с другими частями прибора. Насадка *AB* имеет цилиндрическую вырезку, в которой замастичена стеклянная трубка *CC*. При таком устройстве манометров выигрывается в объеме газа, заключающегося в манометрической трубке, что весьма важно в большинстве случаев, потому что этот газ, находящийся вне прибора, подвержен иной температуре, чем остальная масса газа, и поправка на это различие температур весьма сомнительна. Вследствие этого всегда желательно, чтобы масса газа, находящегося в манометре и вообще вне ванны с постоянною температурою, была как можно меньше. Придавая концам манометра вид полушаров с припаянною капиллярною трубкою, как это делается обыкновенно, мы должны оставлять в верхней части манометра гораздо более, чем здесь, газа, потому что чрез ту часть манометрической трубки, к которой произведено припаивание, нет возможности делать отчетливых наблюдений вследствие того, что поверхность стекла здесь приобретает неправильные изгибы и изображение получается неточным. Сверх того, изображенный на рис. VI-3 способ окончания манометрических трубок представляет ту выгоду, что тогда есть легкая возможность в верхней части манометра иметь острие *D* и этим способом определить раз навсегда объем газа, остающийся вне прибора.

Для этой последней цели весьма часто наносятся деления на стенках трубки. Но способ этот представляет существенный недостаток, потому что деления трубки находятся в другом расстоянии от объектива, чем центр мениска и, следовательно, нельзя единовременно наблюдать эти оба объекта. При существовании острия это вполне устраняется и, кроме того, тогда получается возможность определять положение верхней части мениска не только чрез освещение сзади, но и освещая спереди, и пользуясь общеизвестным приемом наблюдения самого острия и его отражения в мениске, — для определения верхней части этого последнего. Считаю не лишним заметить, что примененный мною способ освещения менисков при их отчете представляет, кроме других удобств, еще и то, что не требует особого навыка, как все другие способы при их применении, так что лица, никогда не производившие наблюдений подобного рода, сразу находят точное положение

верхней части мениска; тогда как применение других способов, сколько я заметил, весьма много зависит от навыка. В этом способе еще есть та выгода, что днем и вечером явление представляется совершенно одинаковым, так что от времени наблюдения отчетливость нисколько не меняется. Располагая прибор, в котором наблюдаются мениски, между окном и катетометром и прикрывая верхнюю часть трубки черною ширмою, поставленною между окном и мениском, а именно над ним на 1—2 мм., легко достичь очень точного отчета, потому что тогда, как в вышеописанном способе, освещение производится только горизонтально идущими лучами, и картина, представляющаяся в трубу (рис. VIII-31), состоит из черного, ясно ограниченного мениска на белом поле.

В заключение этой главы войду еще в некоторые практические подробности, касающиеся наблюдений с микрометрами, имея в виду то обстоятельство, что катетометры Брауэра, снабженные микрометрами, до сих пор нигде не рассмотрены с надлежащею подробностью.

При пользовании окулярным микрометром весьма важно, для того чтобы не иметь погрешностей в записывании и расчете наблюдения, устроить так, чтобы число оборотов и их долей в ту и другую сторону от центральной нити было несомненно очевидным по способу самой записи наблюдения. Для этой цели лучшее средство состоит в том, чтобы число оборотов считать не от центральной нити, а с некоторого одного конца микрометра, а именно в том самом направлении, в каком идут деления шкалы. Деления шкалы в катетометре направлены снизу вверх. При движении нитей микрометра от нижних частей предмета к верхним деления должны возрастать, а как изображение, видимое в трубу, обратно, то в трубе окажется, что при движении микрометрических нитей сверху вниз деления должны возрастать. Для того, чтобы в числе оборотов не иметь погрешностей, в трубах катетометров, как в астрономических трубах, устраиваются непрозрачные гребенки, зубцы которых отвечают передвижению микрометрических нитей в один оборот. В этих гребенках сделаны прорезы, определяющие их число, считая сверху вниз, как видно это на рис. VIII-3. Гребенка A имеет при пятом делении точку, при десятом—линию, при 15-м—линию и точку и при 20-м — две линии. Когда труба изучается, необходимо установить неподвижные нити в геометрическом центре трубы обычным способом, при помощи особого винта. Когда этого достигли, подвижную нить или же — когда имеются две подвижные нити, — середину между ними должно уставить против центральной неподвижной нити,— и произвести отчет по гребенке, которая даст сотни деления, и по барабану микрометра, что даст десятки и единицы. Так, например, в одной из труб катетометра центральная линия отвечает 982,5 делению. Когда производится микрометрическое измерение этою трубою, из показания микрометра в данном наблюдении должно вычесть указанное число, дабы получить в делениях микрометра расстояние подвижных нитей от неподвижной центральной нити. Так, например, при способе компараций пусть будет установлена неподвижная нить на верхней части мениска ртути, а подвижные нити на ближайшую черту

шкалы и пусть наблюдаемый отчет по микрометру будет 1072,6. Так как это число больше 982,5, то это показывает сразу, что ближайшее деление шкалы находится поверх мениска, а именно разность высот мениска и наблюденной черты шкалы = 1072,6 — 982,5 = 90,1. Зная при данной выдвижке значение одного деления микрометра в делениях шкалы, мы тотчас узнаем, какую высоту имеет по отношению к шкале верхняя часть мениска, а именно, высота эта будет равна высоте виденного деления шкалы без того числа долей, которое отвечает 90,1 делениям микрометра. Только при таком способе записи отчета микрометра не может произойти никогда погрешности в ту или другую сторону, что может нередко встречаться при других известных мне способах записи отчетов микрометра. Конечно, необходимо при этом, чтобы и на барабане микрометра находились деления, соответственные тому порядку, в котором возрастают числа самых оборотов, то-есть при движении подвижных нитей сверху вниз деления барабана должны возрастать от 0 до 100 и т. д. Предварительно при установке прибора необходимо убедиться в том, отвечает ли нуль барабана острым концам зубцов гребенки, или ее углублению, дабы потом не иметь ошибки в расчете сотен делений или целых оборотов винта. На рис. VIII-3 изображено то, что видно в окуляре, а именно: кроме гребенки A виден мениск ртути CB. Эта часть поля кажется при описанном выше способе освещения темною, а часть EC освещенною. При передвижении трубы на шкалу будут видны деления шкалы в CD, и тогда подвижную нить D можно уставить микрометром на одно из ближайших делений шкалы.

Когда идет речь о точных измерениях катетометром, необходимо, чтобы самый катетометр и наблюдаемый объект были совершенно прочно установлены и не представляли никаких заметных колебаний. В таких местах, как города, где уличная езда заставляет колебаться здания, необходимо для установки катетометра иметь фундаменты, проникающие до твердой почвы. В той части химической лаборатории С.-Петербургского университета, в которой производятся описываемые здесь исследования, для этой цели устроены из известковой плиты конические столбы, книзу расширяющиеся и углубленные в почву около пяти аршин от полу, то-есть от поверхности земли примерно аршина на четыре вглубь земли. На такого рода фундаментах установка катетометра и наблюдаемых предметов имеет всю желаемую степень прочности, когда дело идет об определении не только сотых, но и тысячных делений миллиметра, в особенности, когда объектом служат деления шкалы, например при производстве компараций двух шкал между собою. Когда наблюдения производятся над высотами ртутных столбов, тогда уже трудно ручаться за тысячные доли миллиметра, по многим причинам, о которых речь была уже выше, а между прочим потому, что некоторые перемены в температуре ртути и газов, и оттого в давлении их, не допускают уже достижения точности до тысячной доли миллиметра, хотя эта величина еще и может наблюдаться при увеличении трубы в 40 раз. Здесь необходимо упомянуть еще и о том, что самая толщина паутинных нитей, при помощи которых производится

определение, не допускает уже довести установку до всей возможной точности, в особенности по отношению к определению ртутных столбов. Направляя неподвижную нить на верхнюю часть мениска, наблюдатель должен остановить движение трубы в том случае, когда середина неподвижной нити закроет верхнюю часть мениска; а так как нить неподвижна и мениск в широких трубах плоский, то самая точная установка оказывается невозможною. Если трубки тонкие, то тогда установка этого рода еще возможна, но при широких трубках этого сделать нельзя, потому что в узкой трубке мениск представляет такую выпуклость, что по ее направлению есть возможность судить о том, приходится ли верхняя часть мениска против середины неподвижной нити или ближе к верхнему или нижнему ее краю. Но когда наблюдение производится в широких трубках, этого сделать нельзя, потому что вся верхняя часть мениска почти представляет однообразную плоскость или, правильнее сказать, кривизна мениска тогда закрывается толщиною паутинной нити и чрез это теряется возможность произвести окончательно точную установку. Замечу впрочем, что в решении вопросов, представлявшихся в нашем исследовании, упомянутые поводы малых погрешностей не имеют влияния на результат, по той причине, что обстоятельства другого рода, а в особенности небольшие перемены температур ртути и газа, доставляют погрешности более значительные. В таких наблюдениях, где интерес точнейших определений был весьма велик, как например в наблюдениях над упругостью газов при малых давлениях, там принято было во внимание и тотчас упомянутое обстоятельство, то-есть влияние толщины паутины на отчетливость результата. Для этой цели производился отчет микрометром в двух положениях: в первом положении, когда между нижнею частью нити и верхней частью мениска был виден свет, и во втором положении, когда свет был виден между верхнею частью нити и верхнею частью мениска. Среднее из обоих отчетов представляет истинное положение мениска. Но наблюдения этого рода, требующие гораздо более времени, в других исследованиях не были применяемы, так что уже по одной той причине, что установка производилась на средину неподвижной нити с некоторою погрешностью, вкрадывается ошибка, достигающая до нескольких тысячных долей миллиметра. Когда катетометрические измерения производились только со шкалами для их компарации, тогда толщина нити не имела никакого влияния, потому что установка на деления производилась при помощи пары нитей, как подвижных, так и неподвижных. Для этой последней цели, около центральной неподвижной нити устанавливаются обе подвижные нити и тогда наводится эта система на деления одной шкалы, по микрометру делается отчет и потом подвижные нити устанавливаются на деления другой сравниваемой шкалы. В этом последнем случае точность наблюдения несомненно достигает до тысячных долей миллиметра, как это будет видно из изложения наблюдений, произведенных для сравнения длины различных шкал между собою.

Восьмая глава

Первые наблюдения над упругостью разреженных газов

§ 82

Когда оказалось, из наблюдений над изменением объемов газов под давлениями бо́льшими атмосферного, что Бойль-Мариоттов закон не строго применим к газам, даже и к таким постоянным, как водород и азот, тогда стало укрепляться мнение о том, что названный закон строго применяется только к предельному, весьма разреженному состоянию, когда газы наиболее далеки от перехода в жидкое состояние. Тогда составилось и затем укрепилось понятие о, так называемом, совершенном газе, в совершенстве следующем как закону Мариотта, так и закону Гей-Люссака. Это понятие положено в основание современного учения о газах и не подвергалось до сих пор, сколько мне известно, ни однажды никакому сомнению. Однако, опытных данных для утверждения этого основного понятия до сих пор вовсе не было. Если Реньо в 1849-м году и произвел три наблюдения над воздухом при давлениях менее атмосферного, то их нельзя считать за подтверждающие понятие о совершенном газе по многим причинам: во-первых, потому, что произведенные наблюдения относятся только к упругости около 300 миллиметров; во-вторых, потому, что и при этом Реньо заметил отступление от Мариоттова закона, в-третьих, потому, что сам Реньо не признает этих своих наблюдений за достаточно полные и не решается делать из них никакого заключения;[1] в-четвертых, потому, что при указанных наблюдениях Реньо держался весового способа, здесь наименее приложимого, по малости массы газа, содержащегося при малых давлениях в шаре, имеющем емкость в 10 литров; в-пятых, потому, что в своих наблюдениях, при столь большом объеме сосуда и при значительной его емкости, Реньо все таки не произвел поправки на изменение емкости от перемены давления, а она должна была быть в этом случае довольно значительна. Другие наблюдатели, начиная с самих Бойля и Мариотта, многократно производившие наблюдения над упругостью газов при малых давлениях, делали эти наблюдения в таких условиях, что об определении малых отступлений от закона не могло быть и речи, вследствие несовершенства примененных методов. Таким образом вопрос о применимости Бойль-Мариоттова закона к разреженным га-

[1] Relation des expériences I p. 139.

зам должно считать по настоящее время вовсе нетронутым с опытной стороны.

А между тем в разреженном газе малое (абсолютное) изменение давления влечет за собой большое (абсолютное) изменение объема, подобно тому, как при значительном сжатии малые изменения объемов отвечают большим переменам давлений,[1] а потому, если есть отступления от закона здесь, как и там, они должны выражаться ясно. Можно думать (см. § 2) поэтому, что при разрежении, особенно при значительном, получатся ясные отступления от Мариоттова закона, если только он, действительно, не составляет предельного состояния газа. Если же последнее справедливо — опыт подтвердит это, до сих пор распространенное понятие.

По изложенным выше причинам, приступивши в наблюдениям над упругостью газов, я старался прежде всего получить понятие об упругости разреженных газов. Наблюдения этого рода, направленные сообразно тому, что сказано в § 7, начаты были мною вместе с М. Л. Кирпичевым весною 1872 года, но тогда на первых порах встретились некоторые практические затруднения, заставившие отложить наблюдения до приобретения более совершенных мерительных приборов, а потому они были отсрочены до осени 1872 г. Сперва болезнь, а потом отъезд М. Л. Кирпичева заставили меня одного заниматься наблюдениями этого рода в течение конца 1872 г. и начала 1873 г. Тогда были устроены два новых ($n°$ 2 и $n°$ 3) более совершенных прибора для указанной цели и в $n°$ 3 сделаны были первые полные, хотя и предварительные наблюдения, показавшие, что при малых давлениях существуют отступления от Мариоттова закона не менее, если не более значительные, чем при больших давлениях.

При устройстве двух первых упомянутых приборов я старался определить объемы газа по меткам и предварительному изучению ёмкостей, а давление по открытому в воздух ртутному манометру или по масляному закрытому манометру. Эти приемы оказались после первых опытов мало надежными, а потому в приборе $n°$ 3 для определения объема, занятого газом, я непосредственно каждый раз взвешивал вылитую ртуть, давление же определялось в бароманометре, то-есть в высоком закрытом барометре, раз навсегда соединенном с прибором, содержащим газ. В этом же приборе ($n°$ 3) были избегнуты краны и введен ртутный запор (§ 36). Эти улучшения тотчас оказались полезными для увеличения степени точности результата, но в приборе $n°$ 3, составленном из широкой (около 40 мм. диаметром) и длинной (более метра) трубки, окруженной водяным резервуаром, оказались практи-

[1] Перемена объема V при перемене давления P на 1-цу (например, на 1 мм) по Мариоттову закону, по коему $V = \frac{C}{P}$; где C есть постоянная величина, равна $\frac{d(V)}{d(P)} = -\frac{C}{P}$, а потому будет тем больше, чем меньше P давление, при коем производится наблюдение. Точно так же $\frac{d(P)}{d(V)} = -\frac{C}{V}$.

ческие неудобства, зависящие от высоты прибора, а потому я решился устроить новый ($n°4$) прибор, для составления которого взят был яйцевидный сосуд, вмещающий около 40 килограммов ртути, и вновь устроенный бароманометр, наполненный так, как описано в § 41, стр. 97 [=366]. Прибор этот ($n°4$) изображен на рис. V—1 в плане, на рис. V—2 в разрезе чрез ванну с яйцевидным сосудом, на рис. VI—1 в общем виде и на рис. VII—1 в схематической форме. Приборы $n°1$, $n°2$ и $n°3$ я не изображаю и не описываю, потому что в $n°4$ находятся в наилучшей комбинации те же приспособления, какие в отдельности встречаются в предшествующих приборах. Опыты с этим прибором $n°4$, начатые мною вместе с М. Л. Кирпичевым с осени 1873 года и продолжавшиеся до лета 1874 года, описываются в этой главе. Эти опыты, утвердившие вывод, сделанный с прибором $n°3$, заключают в себе далее разбираемые замеченные мною некоторые из устранимых недостатков, а потому я считаю их только предварительными и по этой причине устроил затем прибор $n°5$, в котором эти недостатки устранены. Описание опытов в этом последнем приборе будет помещено в одной из следующих глав.

В этой главе я далее рассмотрю те общие начала, на которых основано устройство моих приборов для изучения упругости разреженных газов; далее опишу устройство прибора $n°4$, в подробностях и те приемы, какие употреблялись при наблюдении и расчете; потом будет приведена в виде примеров часть данных для воздуха, водорода и углекислоты. Большинство самых наблюдений произведено М. Л. Кирпичевым или им вместе со мною. В конце этой главы я обращусь к рассмотрению некоторых следствий из добытых нами результатов.

§ 83

Начала, которых держался я при устройстве приборов для изучения упругости разреженных газов, суть следующие.

1) Масса газа под разными давлениями оставалась во все время опыта, то-есть в целом ряде наблюдений, постоянною. Таким образом, эти наблюдения относятся к числу настоящих объемных определений. (Глава II, § 24).

2) Перемена объема газа определяется и выражается непосредственно в весе ртути, выливаемой из прибора и заменяющейся расширяющимся газом. Для суждения о количестве ртути, вылившейся из прибора, она непосредственно взвешивалась. Объем газа в данном наблюдении был равен сумме ртути, вылившейся во всех предшествовавших наблюдениях данного ряда, + объем газа, заключающегося в манометре и тех тонких капиллярных трубках, которые соединяют манометр с прибором, из которого вытекает ртуть.

3) Для определения упругости, свойственной газу при разных объемах, служит бароманометр, то есть сифонный барометр, короткая ветвь которого соединяется капиллярною трубкою с сосудом для газа и ртути. Эта короткая ветвь барометра называется далее манометрическою. Положение уровня ртути в манометрической ветви можно сделать при всех давлениях постоянным, если при уменьшении давле-

ния из барометра выливать часть ртути, а при увеличении давления увеличивать количество ртути в барометре. Таким образом, соответственно определенной черте или игле (рис. VI-3), уровень ртути в манометре оставался во время наблюдения при разных давлениях один и тот же; а потому над этим уровнем оставалось в манометре одно или приблизительно одно и то же количество газа. Употребляя непосредственно барометр, а не комбинацию открытого манометра и барометра, избегается не только двойное отчитывание высот (барометра и манометра), но и двойная погрешность, оттого входящая, и этому последнему обстоятельству я приписываю не маловажное значение по отношению к достоинствам получаемых результатов.

4) Так как объем воздуха в манометрической трубке, находящейся вне ванны, для возможности точного отчета, нельзя было сделать чрезвычайно малым, вследствие необходимости широкой манометрической трубки, для избежания капиллярной поправки, то и объем самого сосуда, содержащего газ, а следовательно и количество ртути, в него вмещающееся, должны быть значительны; иначе вне ванны оказалась бы при значительных давлениях весьма большая доля массы воздуха, взятого для опыта. Таким образом, пришлось иметь сосуды довольно значительной емкости, а именно в три или четыре литра, то-есть вмещающие от 40 до 60 килограммов ртути. Так как манометрическая ветвь при диаметре в 20 мм. содержала по крайней мере такое количество воздуха, которое соответствует 20 граммам ртути, а в соединительных капиллярных трубках вмещается приблизительно половина этого количества газа, то для того, чтобы при высшем, то-есть атмосферном, давлении, иметь массу газа гораздо бо́льшую, чем 30 гр. ртути, нужно было при этом давлении брать такое количество газа, которое по крайней мере в 30 раз более количества газа, вне ванны находящегося, то-есть содержащегося в манометре и соединительных капиллярных трубках. Наименьший объем газа мы брали в 1000 граммов ртути, а так как наибольший объем был примерно в 50000 граммов ртути, то можно было достигать разрежения в 50 раз, следовательно, изойдя из атмосферного давления, делать последние определения при упругости около 15 мм. ртутного столба. Еще точнее, как мы и делали, брать в начале объем газа в 5 или около того килограммов ртути, но тогда можно было достигать разрежения только в 10 раз, то есть от атмосферного давления доходить до давления в 75 или около того миллиметров.

5) Если желательно было итти далее, то есть делать определения при упругостях еще меньших, необходимо было вначале брать газ под давлением не атмосферным, а меньшим его, например, если желательно было дойти до упругости в $^1/_2$ мм. (далее мы не шли в этом ряде наблюдений), то необходимо было исходить, при объеме в один килограмм ртути, от газа под давлением около 25 мм. Отдельные ряды, получаемые для разных масс газа, могли быть связаны между собою данными для давлений, общих в обоих рядах.

6) Главная масса газа, а также и ртуть, вмещающаяся в сосуде, были окружаемы большою массою воды и поддерживаемы при темпе-

ратуре, возможно равномерной, средствами, которые будут описаны далее. Мы брали в этих опытах температуру в 17,5° Ц. за нормальную и определяли ее по одному из термометров, сочтенному нами за нормальный. Термометр этот имеет 50 делений на градус, и в лупу легко читаются десятые доли каждого деления, то-есть тысячные доли градуса.

7) Определения упругости, производимые в барометре, исправлялись по отношению к температуре ртути; а небольшие уклонения в температуре ванны служили для поправок по отношению к температуре газа, которая в отдельности рассчитывалась для той доли газа, которая находится в ванне, и для той доли газа, которая находится вне ванны, то-есть в манометрической ветви и в соединительных трубках.

8) Предварительным изучением определялось изменение ёмкости сосуда при перемене давления, и поправка этого рода введена была во все наблюдения.

9) Полученные и исправленные объемы и давления, выраженные в условных величинах, перемножались между собою и полученные произведения из давления на объем сравнивались между собою, принимая произведение для начального давления за единицу. Таким образом получалась возможность сравнивать отдельные ряды наблюдений между собою.

10) Для удостоверения в том, что наш прибор представляет совершенную герметичность запоров и соединений, равно как и в том, не выделяется ли что-либо из ртути, после возможного разрежения, когда в приборе оставался газ под малым давлением, мы оставляли каждый раз на сутки или более того газ внутри прибора и наблюдали, сохраняя постоянную температуру ванны, не переменяется ли давление, т. е. не возрастает ли оно, что было бы, если бы нечто не выделялось из ртути или если бы прибор пропускал газ. Когда раз достигнута была полная герметичность всех скреп, она удерживалась и все время, перемен в упругости не было.

11) Наполнение сосуда ртутью должно делать снизу, приливая ртуть из высоко стоящего резервуара и заставляя проникать ее чрез особый сосуд для отстаивания, чтобы не ворвалось со ртутью воздуха. Трубка с краном, служащая для выливания ртути из сосуда, должна иметь длину более барометрической, чтобы и при разрежении выливание совершалось беспрепятственно.

На рис. VII—1 представлена схема устройства прибора $n°$ 4. Он состоит, главным образом, из двух частей: из яйцевидного сосуда A, помещенного в водяную ванну (которая на схеме не изображена) и содержащего главную массу газа, и из барометра ZN, представляющего барометрическую ветвь N и манометрическую ветвь Z. На этой последней в l имеется указатель постоянного объема газа, до которого доводится каждый раз стояние уровня в этой части прибора. Таким указателем первоначально служила тонкая черта, сделанная на стенке трубки манометра, а впоследствии стальная насадка, изображенная на рис. VI—3 и описанная выше (стр. 207 [=515]). Дабы иметь возможность в манометрической ветви удерживать ртуть при разных давлениях в одном и том же положении, должно было при уменьшении

давления выливать при посредстве крана T часть ртути, содержащейся в барометре, а в случае, когда давление возрастало, количество ртути увеличивалось при помощи воронки R и соответственного крана S. Таким образом, давление определялось в сущности высотою столба ртути, находящейся в барометрической трубке N. Конечно, некоторое различие в положении ртути в манометре было и при каждом отдельном опыте, а потому манометрическая ветвь была предварительно калибрована, и ёмкость одного миллиметрического деления близ указателя была предварительно известна. Таким образом, зная насколько положение ртути отличается от нормального положения, отвечающего указателю, легко было знать объем воздуха, содержащегося поверх ртути в манометрической трубке. Емкость барометрической пустоты, судя по сказанному, при различных давлениях была различна, и предварительными опытами необходимо было узнать, какое давление действует на барометрический столб ртути при разных ёмкостях пустоты. Для того, чтобы можно было производить поправку на упругость оставшегося воздуха, необходимо было на барометрической ветви прибора иметь соответственные деления или знать объемы, отвечающие меткам. Если известна поправка x_1 при некотором объеме v_1, то при объеме v_n искомая поправка x_n барометра будет равна $\frac{v_1 x_1}{v_n}$ (см. § 49). Таким образом высоты ртутных столбов, наблюденные способом компарации в барометре N, исправлялись, во-первых, на упругость воздуха, оставшегося в барометрической пустоте, соответственно предварительному изучению барометра, и во-вторых, на температуру ртути, приводя наблюденную высоту к определенной средней температуре, за которую мы приняли 17,5°. Что же касается до капиллярной поправки, то она не была вводима по той причине, что трубки барометра и манометра в приборе $n°$ 4 имели диаметр около 20 мм., и наблюдения производились каждый раз при восходящем или нисходящем положении менисков (стр. 103, 104 [=374, 375]).

Сосуд A представляет яйцевидную форму и кончается наверху острым конусом, постепенно переходящим в капиллярную трубку ab, соединяющую сосуд A с манометрическою ветвью Z. На той части ih капиллярной трубки, которая выдается из ванны, нанесены деления и одно из них i принято за исходное. От него считался каждый раз объем воздуха, находящегося в сосуде A. Сосуд этот внизу кончается стеклянною трубкою fB, имеющею высоту более барометрической. Внизу этой трубки находится кран C, при помощи которого всегда есть возможность уменьшить количество ртути в сосуде A и чрез то увеличить объем газа, содержащегося в приборе. Для наполнения же сосуда A ртутью служит боковая стеклянная трубка J, снабженная краном H и сообщающаяся с резервуаром G, содержащим чистую ртуть. Выливание ртути из этого сосуда производится чрез трубку, снабженную местами такими же сужениями, как и бунтеновское приспособление барометров. Такое приспособление давало ручательство в том, что вместе со ртутью не будет увлекаться в прибор пузырьков воздуха. Сверх того, в нижней части, близ крана D, трубка J представляет расширение, назна-

ченное для той же цели. Таким образом, наполнив первоначально из резервуара G весь сосуд A ртутью до метки i капиллярной трубки a и заперев кран D, мы будем иметь в приборе только тот воздух, который содержится между метками i и l в капиллярной трубке и манометрической ветви. Выпуская затем из крана C определяемое чрез взвешивание количество ртути, мы будем знать объем, занимаемый воздухом. Он будет равен объему воздуха между метками + объем ртути, вылитой из прибора.

Дабы иметь возможность вводить в прибор или выводить из него по желанию воздух, или заменять его другим газом, капиллярная трубка ab имеет нисходящую ветвь ck, которая составляет ртутный запор, описанный на стр. 84 [=350] (§ 36). На рисунке он представлен открытым, ибо конец k капиллярной трубки не закрыт ртутью. В этом состоянии сосуд A при помощи крана P и капиллярной трубки kc может быть сообщен с прибором, развивающим газ (так на рис. VI изображен прибор C_1, развивающий углекислый газ). Когда в сосуд A впущено этим путем желаемое количество газа, он может быть замкнут в приборе, для чего достаточно открыть кран Q и поднять воронку Y со ртутью вверх. Из нее ртуть войдет в трубку M, окружающую ртутный запор, и если при этом кран P заперт, то чрез это сгустит в M воздух, а потому в kc ртуть поднимется выше уровня в трубке M. Когда это достигнуто, кран Q запирается и, следовательно, ртуть в kc будет замыкать газ, впущенный в A.

Выливая из сосуда A, после его наполнения до метки i, первое количество ртути, мы можем оставить в приборе воздух или другой газ в желаемом объеме и под желаемым, более или менее значительным, давлением. Когда вылилось желаемое количество ртути из крана C, тогда запор запирается ртутью и уравнивается температура ванны до нормальной, а потом отчитывается по способу компарации (с метром, стоящим около барометра) (§ 79) показание бароманометра для определения давления и определяется стояние ртути в манометрической ветви и в ртутном запоре, дабы знать объем газа вне ванны. Сверх того, определяется температура воздуха, вне ванны находящегося, особым термометром, стоящим подле манометра и окруженным такою же трубкою, как и манометрическая. Зная положение ртути в запоре, мы узнаем объем, занятый в нем газом, если предварительно была калибрована та капиллярная трубка, которая употреблена для составления ртутного запора.

§ 84

Таким образом объем газа определится из суммы четырех величин, из коих три мало изменяются: 1-е, из объема газа, находящегося в ванне, начиная от метки i. Этот объем определится по весу вытекшей ртути. 2-е, из объема газа, находящегося в запоре, начиная от некоторой определенной черты или метки. Объем этот определится по отчету положения ртути в запоре в момент наблюдения. 3-е, из объема газа в манометрической ветви, считая от особой метки, которая находится на манометрической трубке. 4-е, из объема газа, находящегося

между метками i в капиллярной трубке, l в манометрической ветви и особой метки в запоре.

Предварительными опытами необходимо было определить ёмкость воздуха, находящегося между этими метками. Это было достигнуто двумя способами, которые служили для взаимной проверки и были достаточно согласны между собою. Первый непосредственный способ состоял в том, что прежде составления прибора, те части его, которые находятся между метками, были наполнены ртутью, и весом вмещающейся ртути выразился объем этих частей. Способ этот представляет тот существенный недостаток, что при нем необходимо было разбить все определение емкости на несколько отдельных определений, так как та часть прибора, которая находится между метками, составляется из трех отдельных частей: из верхней части манометра, из капиллярной трубки, которою кончается сосуд A и из T-образной трубки, составляющей запор. Весьма точно можно было определить емкость каждой из этих частей в отдельности; но при составлении прибора необходимо было прибегнуть к замастичиванию для герметического соединения названных трех частей и в местах стыка можно было подозревать содержание неопределенного объема воздуха, потому что не было никакого признака для определения того, что стык хотя бы и герметический был произведен совершенно плотно. Он мог быть герметичным, но внутри могли оставаться пустоты, в которые газ распространялся.[1] Поэтому то и был применен второй способ определения. Он состоит в пользовании законом Мариотта. Определение емкости по этому способу производилось следующим образом. Стояние ртути в капиллярной трубке i доводилось сперва до черты, потом запор запирался ртутью и в нем положение ртути также доводилось до метки; затем и в манометрической ветви ртуть также устанавливалась на метку. Таким образом, в приборе оставался неизвестный и искомый объем воздуха между метками, давление которого измерялось в барометре. Затем из сосуда A выливалось некоторое количество ртути, которое мы назовем чрез v_1, и после того, как в манометре, так и в запоре стояние ртути опять доводилось до соответственной метки и определялось давление, которое назовем чрез h_1, называя чрез h_0 первоначальное давление. Назовем искомый объем между метками чрез x, тогда очевидно будем иметь $xh_0 = (x + v_1)h_1$, откуда и определим x. Произведя такого рода определение несколько раз при разных объемах v_1, мы можем узнать значение x с большою точностью, в особенности если вывести поправку, находимую из дальнейшего определения отступлений от Мариоттова закона. Эти последние отступления определялись из дальнейших опытов, и оказалось, что для той степени точности, какая требуется для нахождения x, вследствие малой величины этого x, а также и вследствие малости отступлений от Мариоттова закона при давлениях, близких к атмосферному, можно довольствоваться

[1] В приборах, устраиваемых ныне мною, это обстоятельство обойдено и есть возможность знать прямо по весу ртути емкость всех частей, находящихся вне ванны, и определить их после составления прибора.

Мариоттовым законом, дающим для x значения, согласные с непосредственно наблюденными по вышеописанному способу. Таким образом мы убедились в том, что в местах стыка капиллярных трубок нет значительных пустот, увеличивающих объем, и следовательно непосредственное определение объемов можно было считать достаточно точным. Объем между метками, определяемый опытами, мы будем далее означать чрез w_0.

Объем газа, содержащегося в ванне, хотя и был при самом опыте приводим каждый раз [1] по возможности к температуре, принятой за нормальную (17°,500), однако на основании действительно наблюденной температуры ванны, немного отличающейся от 17°,5, перечислялся на объем при условной температуре (17°,5), к которой отнесены все опыты с $n°$ 4. Наблюдения температуры ванны производились термометром, градус которого делен на 50 частей и представляет длину около 25 мм., так что при отчете лупою легко было наблюдать тысячные доли градуса. С этим термометром, временно принятым за норму, но предварительно выверенным, сличены были и все другие термометры, бывшие в деле при наблюдениях в приборе $n°$ 4. Притом, самая температура ванны удерживалась сколь возможно близко к указанной нормальной температуре. Для этой последней цели ванна была устроена так, как представлено в разрезе на рис. V—2. Сосуд, вмещающий воздух и ртуть, здесь означен буквою E, а ванна буквою A. В ванну влита вода и она окружена худыми проводниками тепла.[2] Для наблюдения температуры служил термометр T, который здесь представлен сзади сосуда E. Для перемешивания воды в ванне, равно как и для регулирования ее температуры, служит мешалка, состоящая из пустого, легкого, латунного кольца dd. К этому кольцу прикреплены две параллельных латунных трубки GG (то же означение см. рис. VI—1), скрепленных наверху перехватом, видным как на рис. V—2, так и на рис. V—1, где буквы имеют те же значения, как и на рисунке V—2. Эти трубки GG открыты вверху и, таким образом, могут служить для вливания и выливания воды из кольца мешалки dd. Если будет замечено, что температура ванны, показываемая термометром T, ниже 17°,5, то чрез воронку c вливается некоторое количество теплой воды, мешалка приводится в движение вверх и вниз и чрез тонкие металлические стенки кольца dd температура весьма быстро распределяется равномерно во всей ванне. Таким образом, легко довести температуры до величины, весьма близкой к 17°,5. По временам из внутренности кольца dd необходимо отливать часть воды, чтобы облегчить его и дать место вновь приливаемой воде. Для этой последней цели, в другую трубку G вставлен, как видно на рис. V—2, сифон, кончающийся каучуковой трубкою f, идущею ниже ванны. (На рис. V—2 изображена только часть этой трубки, на рис. VI—1 та же трубка означена буквами ef.) На конце

[1] В дальнейших работах этого не делалось, довольствуясь тем, чтобы в данном ряде наблюдений, производимых с некоторою массою газа, сохранялась по возможности одна и та же температура.

[2] Опыт показал мне, что для этой цели практичнее всего брать несколько слоев толстой и плотной бумазеи и затем слой папки.

этой каучуковой трубки находится зажим, а сифон остается всегда наполненным водою. Открыв зажим сифона, мы выльем избыток воды из кольца *dd* и таким образом получится вновь достаточное пространство для прилития нового количества воды теплой или холодной, смотря по показанию термометра *T*. Таким образом весьма скоро каждый раз можно было доводить температуру до желаемой, с точностью до 0,01 доли градуса. Таким образом наибольшая температурная поправка относительно главной массы воздуха не превышала 0,02 долей градуса, и при такой незначительной величине поправки можно было принять коэффициент расширения газов, взятых под разными давлениями, за величину постоянную. При 17°,5 (*C*) коэффициент расширения был принят равным $\frac{0{,}00367}{1+0{,}00367\cdot 17{,}5} - 0{,}00003$ (последнее число есть коэффициент расширения сосуда) $= 0{,}00343$. Прямые [1] наблюдения показывали в начале опыта наступление времени, когда температура ртути и воздуха в *E* уравниваются с температурою ванны *A*, а тогда она уже изменяется чрезвычайно медленно.

Подобным же образом производилась поправка на температуру того объема газа, который находится вне ванны, а именно в манометре поверх ртути и в соединительных капиллярных трубках. Этот объем всегда был относительно не велик, и вся поправка (для приведения его объема к 17°,5), относящаяся до него, была незначительна, даже в том случае, когда температура этой части газа отличалась от нормальной 17°,5 (C) даже на два или на три градуса. В самом деле, при разнице температуры на 3 градуса и при емкости газа, вне ванны находящейся, равной 30 граммам ртути, температурная поправка объема газа равняется $30 \cdot 3 \cdot 0{,}00343 = 0{,}309$, то-есть поправка на каждый градус не превышает дециграмма ртути; а так как весь (в сосуде и вне его) измеряемый объем газа никогда не был меньше тысячи граммов, следовательно вся температурная поправка для газа вне ванны при этом не будет превышать 0,0001-й доли объема. Поэтому вследствие введения этой поправки нельзя ждать сколько-либо значительной погрешности. Дабы знать температуру воздуха, вне ванны находящегося, был помещен, как сказано выше, подле верхней части манометра особый термометр, окруженный резервуаром, подобным манометрической трубке, и термометр, служащий для этого определения, был предварительно сличен с термометром, находящимся в ванне. Термометр этот виден на рис. VI—1 в *Z*.

§ 85

Сверх поправки на изменение объема газа от температуры, отличающейся от нормальной, не было необходимости вводить температур-

[1] Их легко делать, когда ртуть наполняет сосуд *E* до метки, прямо наблюдая стояние уровня ртути в капиллярной трубке, ибо тогда весь сосуд *E* есть термометр с резервуаром в 3 литра. Если часть сосуда *E* наполнена газом, то о наступлении теплотного равновесия можно судить и по термометру, и по неизменности упругости газа.

ной поправки на изменение объема ртути, находящейся в сосуде, потому что температура ванны держалась сколь возможно близко к нормальной, и если отличалась от нее в первом определении, то во втором и следующих не отличалась более как на 0,01. Происходящие от того различия в объеме ртути были столь невелики, что не могли влиять на результат.[1] Но поправку на изменение емкости сосуда от перемены давления было необходимо ввести, потому что сосуд велик и стенки его относительно тонки, хотя толщина их и не была менее 1 мм. Для того, чтобы получить понятие о том, как велика должна быть поправка на изменение емкости сосуда при перемене давления, предварительно было разочтено по известным формулам Ламе, какое изменение емкости должно произойти с шаром, равнообъемным с нашим сосудом, если бы давление внутри переменилось от 760 мм. до нуля, когда толщина стенок была в $1^1/_2$ мм., то-есть равна средней толщине стенок нашего сосуда.

По формуле Ламе, если внутреннее давление $= 0$, а наружное h, то объем шара, коего емкость при нулевом давлении снутри и снаружи $= V$, претерпит изменение емкости:

$$-\frac{9}{4}\frac{R^3}{R^3-r^3}khV, \qquad \text{(a)}$$

где R и r суть радиусы наружный и внутренний, а k — кубическая сжимаемость материала, составляющего оболочку шара. Эта последняя, судя по выводам Реньо (Relation I—454) для стекла при изменении давления на одну атмосферу, то-есть около килограмма на кв. сантиметр равна:

$$k = 0{,}0000024.$$

Судя по теории упругости

$$k = \frac{3(1-2\mu)}{E},$$

где E есть коэффициент упругости для стекла, по Вертгейму, близкий к 700 000 килограммам на кв. сантиметр, а μ отношение поперечного сжатия к удлинению, происходящему при растягивании; оно для стекла, судя по опытам Корню, $= {}^1/_4$. Определяя этим путем k, получаем

$$k = 0{,}0000021,$$

а потому уверенность в числе, данном Реньо, возрастает и его можно принять для расчета. В формуле (а) дробь $\frac{R^3}{R^3-r^3}$ может быть преобразована, называя толщину стенок чрез e, ибо тогда R^3 можно

[1] Пусть, например, в сосуде было 40 000 гр. ртути и ее температура изменилась на 0,01. Объем ее от этого изменится на 0,01(0,00018—0,00003) 40 000 = 0,06 грамма, а самое взвешивание заключало в себе погрешности большие, чем эта. В дальнейших опытах этот род поправки однако введен.

принять $= r^3\left(1 + 3\frac{e}{r}\right)$, так как r очень велико сравнительно с e. Тогда сжимаемость шарообразного сосуда будет

$$-\frac{9}{4}\frac{r+3e}{3e}khV \text{ или близка к } -\frac{3}{4}\frac{r}{e}khV.$$

Так как наш сосуд вмещает около 45 000 гр. ртути, то равнообъемный ему шар должен иметь $r = 9{,}25$ сант., а $e = 0{,}15$ сант., а потому при изменении давления на 1 атмосферу изменение ёмкости шара будет

$$-\frac{3}{4}\frac{9{,}25}{0{,}15}0{,}0000024 \cdot 1 \cdot 45\,000 = -5{,}0 \text{ гр. ртути.}$$

Следовательно, если бы сосуд наш был шар, с равномерными стенками в $1^1/_2$ мм., то при изменении давления на 1 сантиметр его емкость менялась бы на $\frac{5{,}0}{76} = 0{,}066$ гр. ртути, а такая величина может оказать существенное влияние на результат опытов. Предполагая даже, что сосуд наш будет шаром с радиусом в 8 сантиметров и с равномерною толщиною стенок в 2 мм., получили бы для него сжимаемость на 1 сантиметр давления $= 0{,}043$ гр. ртути, а такой большой толщины стенки иметь не должны,[1] судя по примеру других подобных сосудов, заказанных единовременно с тем, который помещается в приборе $n°4$, а потому для нашего сосуда должно было ждать легко измеримого изменения объема.

Такие расчеты показали, что возможные изменения объема сосуда при перемене внутреннего давления столь значительны, что ими пренебречь нельзя, а потому нужно было опытным путем найти для данного сосуда те изменения, которые совершаются с его объемом при перемене внутренних давлений. Для этой цели служила та капиллярная трубка (ah рис. VII—1, а рис. V—2, ab рис. VI—1), которая выдается из ванны и которою оканчивается сосуд, вмещающий газ. Эта капиллярная трубка была предварительно калибрована и емкость одного миллиметра ее была, следовательно, известна. Если весь яйцевидный сосуд и капиллярную трубку наполнить ртутью так, чтобы она занимала самую нижнюю видимую часть капиллярной трубки, дать ртути принять температуру ванны, заметить давление на манометре и затем уменьшать давление газа внутри прибора, то величина сжимаемости стенок сосуда от перемены давления определится по числу делений, на которое ртуть будет подниматься в капиллярной трубке. Таким образом определяется, на сколько делений поднимается ртуть в капиллярной трубке при кажущемся уменьшении давления на известную величину. При поднятии ртути в капиллярной трубке давление ртутного столба, действующего на сосуд со ртутью, возрастает от возрастания величины давящего столба ртути, а потому истинная перемена

[1] В последнее время сосуд этот лопнул и в нем оказались места, имеющие толщину стенок даже в 1,2 мм. А между тем сосуд этот был предварительно испытан под давлением в 6 атмосфер и это последнее он безопасно выдержал.

давления равнялась перемене давления, наблюдаемой в бароманометре без соответственного изменения высоты ртути в капиллярной трубке. Таким образом определилась перемена давлений и соответственное ей изменение в емкости сосуда. Доводя затем давление до первоначального, легко определить, какое изменение в температуре произошло во время опыта, хотя и должно стремиться удержать во все время каждого отдельного опыта сколь возможно равномерную температуру в ванне и во ртути. Такие опыты были повторены нами многократно и при разных давлениях, притом оказалось, что одинаковые перемены давления каждый раз производят почти одинаковые перемены в емкости сосуда.

Привожу результаты нескольких определений этого рода, сделанных с сосудом, содержащимся в приборе $n°$ 4.[1] Определения, далее приведенные, все выражены в миллиметрических делениях капиллярной трубки, емкость же одного миллиметра этой трубки (довольно близкой к цилиндру) по нескольким определениям = от 0,0158 до 0,0161 гр. ртути.

	Первоначальные данные		Последующие данные			Истинная сжимаемость сосуда в дел. кап. трубки [2]
	Давление сант.	Положение ртути в кап. трубке	Давление сант.	Положение ртути в кап. трубке	Температура	
	h_0	a_0	h_1	a_1	T	K_0
9 февр. 1874 г.	16,0	+ 9,5	30,1	— 29,0	17°,503	3,75
	29,0	+ 10,0	45,5	— 34,5	17 ,501	3,71
	45,5	+ 9,2	59,2	— 31,0	17 ,502	4,15
13 февр.	77,62	3,9	58,48	59,0	17 ,848	4,04
	53,48	60,2	77,25	7,3	17 ,850	3,92
	77,26	1,3	58,15	56,7	17 ,860	3,68
	58,15	57,0	77,25	4,0	17 ,861	3,84
20-го окт. 1874 г.	81	88,2	109	8,2	17 ,087	4,00
	109	75.2	128	20,0	17 ,087	4,09
	128	76,8	147	25.2	17 ,039	3.73
	147	83.2	170	21,0	17 ,090	3,71
	170	87,3	195	15,1	17 ,092	4,05

Среднее из определений, сделанных при давлениях, меньших атмосферного, есть 3,87, для давлений выше атмосферного 3,91. Эти числа тождественны в пределах погрешностей опытов этого рода, а потому

[1] Тот же сосуд был по окончании опытов применен для прибора $n°$ 6, изображенного на рис. XI—2, для предварительных опытов над сжимаемостью газов под давлениями от 1 до 5-ти атмосфер.

[2] Судя по вышесказанному очевидно, что $k_0 = \dfrac{a_0 - a_1}{h_1 - h_0 - \left(\dfrac{a_0 - a_1}{10}\right)}$, где знаменатель $a_0 - a_1$ в знаменателе делено на 10, чтобы превратить миллиметрические показания в сантиметры, в коих выражены давления.

должно принять сжимаемость сосуда при изменении давления на 1 сантиметр = 3,89 мм. капиллярной трубки или 0,062 грамма ртути на каждый сантиметр давления. Та степень точности, какую имеет этот результат, совершенно достаточна для целей исследования, потому что наибольшее изменение давления в одном роде опытов при давлениях менее атмосферы не могло превосходить 75 сант., а потому изменение ёмкости не могло быть более 4,85 гр. ртути, а при таком изменении давления погрешность в весе ртути даже на 0,3 грамма не производила ошибки 0,00001, которая удовлетворяла задачам исследования, по крайней мере на первое время, когда не было никаких сведений о сжимаемости газов под давлениями менее атмосферного. Если же упустить всю поправку на сжимаемость сосуда, как это делали исследователи подобных явлений до сих пор, то можно было ждать погрешности в $\frac{1}{10\,000}$, которая значительнее тех отступлений, какие нашел Реньо для газов при изменении давления на один дециметр.

Дабы проверить полученные данные, были сверх того произведены такие же определения при помощи горизонтальной части капиллярной трубки, соединяющей сосуд с манометром. Тогда при перемене емкости сосуда перемещение ртути в горизонтальной части капиллярной трубки не влекло за собой перемены давления и, следовательно, вся перемена в упругости воздуха влияла на изменение емкости сосуда. При этом в среднем из 3-х определений оказалось, что перемена давления на 1 сантиметр влечет за собой изменение в емкости всего нашего сосуда на 0,067 граммов ртути. Эта величина сжимаемости сосуда, вместе с другими данными, полученными в феврале 1874 г., дала среднюю сжимаемость 0.066 гр. ртути на 1 сант. давления и это число было введено во всех опытах, произведенных мною и М. Л. Кирпичевым с газами при давлениях меньше атмосферного.

Когда было определено изменение емкости сосуда от изменения давления, поправка в этом отношении производилась следующим способом: из объема вылившейся ртути вычитался тот объем ее, который по расчету соответствует изменению емкости сосуда чрез соответственную перемену давления, начиная от первоначального давления, взятого в данном ряде опытов.

Если начальное давление, при коем яйцевидный сосуд был полон ртути до метки в капиллярной трубке, назовем h_0 сантиметров, и если затем вылито N граммов ртути, то объем, занятый газом в сосуде, будет, при давлении h_1 сант., равен $N - (h_0 - h_1)$ 0,066 гр. ртути, ибо взвешена не только ртуть, вылившаяся из первоначальной, бывшей при h_0 вместимости сосуда, но и ртуть, вылившаяся от уменьшения давления, то-есть от изменения давления на стенки сосуда изнутри. Сперва и потом на наружные стенки сосуда действовало атмосферное давление (+ давление столба воды в ванне), а изнутри сперва было давление h_0, потом h_1. Если при равных давлениях H, действующих изнутри и снаружи, назовем объем сосуда V, то, если давление внутри станет $= 0$, объем будет $= V - 0{,}066H$, когда давление будет сперва h_0, объем $= V - 0{,}066h_0$, а при давлении h_1, объем $V - 0{,}066h_1$,

поэтому изменение в емкости сосуда будет при перемене внутреннего давления из h_0 в h_1 равно $-0{,}066\ (h_0-h_1)$, а потому если h_0 более h_1, емкость сосуда уменьшится и, следовательно, в вылившейся из сосуда ртути N будет не тот объем, какой занимает после нее газ, а объем меньший, чем этот, на величину $0{,}066\ (h_0-h_1)$.

Такая поправка введена мною во все определения объемов, не только те, о которых идет речь в этой главе, но и во всех последующих, конечно, изменяя коэффициент сообразно свойствам сосуда. Только в самое последнее время (ноябрь 1874 г.) я уничтожаю эту поправку, окружая сосуд жидкостью, в которой давление одинаково с действующим на сосуд изнутри.

§ 86

Сверх вышеразобранной поправки на изменение объема от давлений, необходимо было ввести еще одну поправку на изменение объема сосуда от вмещения в него ртути, ибо вследствие своей растяжимости сосуд при наполнении ртутью увеличивался в емкости, а при выливании ее уменьшался. При этом перемены, происходящие при выливании ртути из капиллярной трубки и даже из первых верхних конических частей сосуда, должно было признать одинаковыми с теми переменами, которые происходят при изменении давления, ибо столб вылившейся ртути после выливания уже не давил на остальную ртуть, а следовательно и на стенки сосуда. Следовательно, давление, действующее на стенки сосуда изнутри, было меньше на столько, на сколько уменьшилась высота столба ртути. При выливании дальнейшего количества ртути нужно было определить, на сколько уменьшится высота ртути в сосуде при выливании из нее определенного количества ртути и по мере уменьшения количества ртути в сосуде уменьшать пропорционально этому величину изменения, происходящего от выливания ртути.[1] Опыты этого рода были сделаны предварительно, и на основании их составлена следующая приблизительная таблица, показывающая изменение емкости от выливания из сосуда ртути в различных количествах.

Когда из сосуда вылито:	1	2	4	10	15	20	40 кгр. ртути,
то при этом с сосудом совершается изменение емкости, равное	1,29	1,38	1,50	1,70	1,80	1,90	2,06 гр. ртути

С этою поправкою должно поступать совершенно так же, как с предшествующею, то-есть зная N, число килограммов вылитой ртути, от него отнимать соответственную величину.

Поправка этого последнего рода при малых количествах вылитой ртути имеет большое относительное значение и здесь она известна была нам

[1] В опытах с другими сосудами поправка этого рода была определена особыми предварительными наблюдениями, о которых в своем месте будет речь. В приборе $n°$ 4 поправка эта не вполне точна, но судя по данным для прибора $n°$ 5, она близка к истине.

с точностью, а при значительных объемах вылитой ртути она так мала, что, если в ней при вышеупомянутом расчете и сделана некоторая погрешность, то во всяком случае незначительная.

Таким образом, для определения объема газа, которого давление определялось барометром, сперва находился объем воздуха в сосуде, помещенном в ванне, и исправлялся на температуру и на изменение давления и количества ртути. Затем находился объем воздуха, вне ванны находящегося, и он также исправлялся на температуру. Найденные и исправленные объемы складывались, чтобы получить весь объем воздуха.

Вся емкость сосуда, находящегося в ванне, доходила до 45 килограммов ртути, а потому, если требовалось произвести определение в небольших пределах изменения давления, можно было для первоначального объема брать значительный объем воздуха в ванне, и тогда влияние тех небольших погрешностей, которые свойственны определению объемов воздуха, вне ванны находящегося, исчезало по своему малому значению. Так как в большинстве наших опытов весь объем воздуха, вне ванны находящегося, не превышал 35 граммов ртути, а если взят был такой объем воздуха, который отвечает 7 килограммам вылившейся из крана ртути, то емкость воздуха, вне ванны находящегося, составляет сама по себе уже не более как $^1/_{200}$ долю наименьшего объема газа; если же в этой величине и была ошибка, например в 0,3 гр. ртути, то она составляла не более как 0,00005 долю первоначального объема, а при окончательном объеме 45 кгр. ртути она была уже глубоко в пределах возможных погрешностей, ибо составляла не более 0,000007 доли всего объема. А такой погрешности (0,3) нельзя было и ожидать.

Имея первоначальный объем газа в 7 килограммов ртути и произведя затем разрежение выливанием всей остальной ртути из прибора, получим окончательный наибольший объем, в $6^1/_2$ раз больший первоначального и, следовательно, тогда окончательное давление приблизительно будет в $6^1/_2$ раз меньше первоначального давления.

Важнейшую величину, определяющую объем газа, составляет таким образом вес ртути, вылившейся из прибора. Эту величину необходимо было определять с возможною степенью точности. Но в определениях этого рода все-таки должно было ждать погрешности, достигающей сантиграммов ртути, по тому уже одному, что малая капля ртути, выливающаяся из крана, отвечала этому весу. Притом, часть ртути, находящейся вне ванны, в трубках, служащих для выливания, была в условиях переменной температуры окружающего воздуха, а следовательно представляла не вполне всегда одинаковый объем. Вследствие этих причин, взвешивание доводилось до точности сантиграмма. Большую степень точности трудно и ждать в скорых и чистых определениях столь значительных весов, каков вес в 45 килограммов. Для взвешивания служили особые весы, на которых можно взвешивать до 20 килограммов с точностью и чувствительностью в сантиграммах. Но чтобы не сделать погрешности в сантиграммах, необходимо было сделать поправку на вес разновесов, применяемых для

взвешивания, ибо значительные разновесы представляют обыкновенно и значительную неточность выверки. Такая поправка на вес гирь была введена во все далее приведенные числа.

Что касается до поправки на взвешивание в воздухе, то в этом случае не было нужды делать ее, потому что взвешивание всей вытекшей ртути производилось сразу и в стклянках приблизительно одинаковой емкости, при помощи одних и тех же гирь и в воздухе одной и той же плотности. Необходимо было в каждом опыте знать только относительные изменения объемов, а не абсолютные их величины. А потому, если без поправки на взвешивание в воздухе и делалась погрешность в абсолютной величине, то в относительной ее не было.[1]

§ 87

В высказанном выше находится описание существа способа, примененного в излагаемых далее исследованиях сжимаемости газов, и мне остается сказать еще несколько слов о расположении частей прибора $n°$ 4 и о ходе наблюдений, чтобы перейти затем к изложению данных и результатов. Рис. V—I представляет в плане расположение всех частей прибора $n°$ 4, служившего для исследования упругости под малыми давлениями. Здесь C представляет каменный устой, проникающий в землю на глубину более 4-х аршин для того, чтобы придать надлежащую прочность установке катетометра, служащего для определения давления. Катетометр, употребленный при этом, имеет две трубы (он изображен на рис. VIII—1); B представляет барометр и A ванну с сосудом для ртути; чрез D означено положение лампы, служащей для освещения ртутного мениска, находящегося в барометрической ветви U и в манометрической ветви X. Расстояние приборов A, B, C взято с натуры, а положение лампы D приближено, ради удобства изображения. Буквы, находящиеся на этом рисунке, те же самые, как и на рис. VI—1 и V—2, так что соответственные части означены теми же буквами. Рис. V—I изображает общий вид прибора $n°$ 4, (то-есть те его части, которые означены на рис. V-I буквами A и B) во время опыта над угольною кислотою, для чего при приборе и находится снаряд C_1, служащий для добывания угольной кислоты. Выделяющаяся угольная кислота или другой газ, с которым производится опыт, поступает по газоотводной трубке c_1 в предварительное сушило b_1. Пред ним он проникает чрез особое приспособление d_1, состоящее из трубки e_1, опущенной в сосуд со ртутью. Пока кран o, имеющийся при сушиле n, не отперт, газ выходит чрез трубку b_1e_1, а при открытии крана o он поступает в прибор, причем в сушиле n устроенном,

[1] Это легко доказать. Назовем два объема, выраженных истинными весами ртути, чрез V и V_1, занятые ею, пусть при взвешивании этой ртути объем единицы веса гирь $= w$, а вес единицы объема воздуха e. Кажущиеся веса ртути будут $V - e\left(\frac{V}{13{,}5} - wV\right)$ и $V_1 - e\left(\frac{V_1}{13{,}5} - w_1V\right)$. Отношение их очевидно равно $\frac{V}{V_1}$ отношению истинных весов.

как описано в § 38, он окончательно высушивается. Из сушила по трубке m газ входит в трубку h, охватывающую капиллярную трубку g, служащую ртутным запором § 36 (рис. VI—4). Из верхней части трубки h, охватывающей ртутный запор, выходит кроме трубки m, идущей к сушилу, еще другая трубка с краном l, которая видна на рис. V—1. Она ведет к особому небольшому сушилу и насосу и служит для того, чтобы при предварительном высушивании прибора не проводить весь влажный воздух чрез настоящее сушило n. У ртутного запора имеется кран i (VI—1) и каучуковая трубка, кончающаяся сосудом k со ртутью. Когда этот сосуд поднят, как представлено на рисунке, и кран i открыт, ртуть в запоре будет подниматься и, следовательно, прекратит возможность входа газа в капиллярную трубку g. Если же нужно открыть запор, то сосуд k переводится в нижнее положение, изображенное на рисунке чрез k_1 пунктиром. На рисунках видны относительные размеры употребленных частей прибора. Капиллярная же трубка g, равно как и другие соединительные трубки a, b имели диаметр от 0,05 до 0,08 сантиметра в отверстии. Ванна, в которой находится яйцевидный сосуд, изображена на описываемом рисунке под буквою A, а чрез g, c, e, f представлены те же части, которые изображены на рис. V—1 и 2. На рис. IV—1 видно то положение, которое занимал в действительности термометр T. Резервуар N для ртути, представленный здесь для ясности изображения вправо от ванны A, в действительности помещался на крышке самой ванны, и в M видна та расширенная трубка, приводящая ртуть, о которой было упомянуто в § 83 (E в VII—1). Она служит для удержания пузырьков воздуха, которые могли бы случайно прорваться при приливании ртути. Из трубки M выходит, кроме приводящей трубки, еще другая трубка, открытая наверху и на рисунке означенная буквою R. Это, так сказать, наружный манометр служащий для определения, во время приливания ртути, положения ее внутри прибора, дабы иметь возможность судить о том, сколько нужно еще прилить ртути в сосуд для наполнения его. Кран, служащий для выливания ртути из яйцевидного сосуда, помещенного в ванне, означен здесь чрез K, а кран для приливания означен буквою L.

Что касается до устройства бароманометра, то он состоял из чугунной треноги и такого же резервуара S, в котором были вправлены барометрическая трубка U и манометрическая трубка X, которая закрыта на рисунке одною из трех, а именно переднею медною трубкою t, служащею для поддержания барометрической трубки. Таких трубок t три; они внизу прикреплены к треноге, а наверху соединены особою скрепою, в которой укрепляются как барометрическая трубка U, так и метр, служащий для компарации. На рисунке видна только верхняя часть этого метра, означенная r. Кроме того, в бароманометре виден сосуд со ртутью Y, в котором погружен термометр, служащий для определения температуры ртути. Этот сосуд устроен из такой же трубки, какая служит для самого барометра. Около XZ изображен сосуд с воздухом, в котором вмещен другой термометр, служащий для определения температуры воздуха, находящегося в манометре поверх ртути. Для прибавления или убавления количества ртути в барома-

нометре служит прибор, изображенный в отдельности на рис. VI-2, в том же масштабе, как и самый бароманометр. Здесь под буквою *a* представлена верхняя крышка резервуара барометра. Она залита слоем мастики и в ней ввинчена железная трубка с краном *b*. Эта трубка кончается затем тонкою изогнутою стеклянною трубкою *c*, чрез которую приливается ртуть. Изгиб этой последней трубки для того и сделан, чтобы вместе с приливаемою ртутью в резервуар бароманометра не входил воздух. Эта трубка с окружена сосудом *d*, содержащим ртуть, назначенную для приливания. Когда количество ртути здесь уменьшается вследствие приливания ее, тогда чрез воронку *g* при открытии крана *f* вливается новое количество ртути. Для того, чтобы убавить количество ртути в сосуде *d*, служит сифон *h*, снабженный краном *i*, находящимся вне трубки *d*. Открыв кран *i*, можно выливать ртуть из *d*, когда внутри этого последнего сосуда давление довольно значительно. Если же краны *f* и *i* закрыты, а из крана *e* насосом выкачивается воздух, то тогда из резервуара бароманометра можно чрез кран *b* вытягивать в сосуд *d* часть ртути и тем убавлять ее количество в бароманометре. Таким образом, можно было довольно точно и, при навыке, быстро регулировать количество ртути в бароманометре, приливая или выливая ртуть, увеличивая или уменьшая давление воздуха в сосуде *d*. Впоследствии, при устройстве прибора *n*° 5, который был назначен для той же цели, как и описываемый прибор *n*° 4, приспособление для приливания и отливания ртути из бароманометра устроено было гораздо проще, как будет описано далее.

Обращение с описанным прибором *n*° 4, представляющим на первый взгляд значительную сложность, при некотором навыке весьма просто. Однако каждый отдельный ряд наблюдений требовал по крайней мере шести часов постоянной работы, не считая времени подготовки к опыту. Опишем теперь ход отдельных наблюдений.

Сперва приливается в яйцевидный сосуд ртуть до тех пор, пока давление газа, находящегося в этом сосуде, не будет равно атмосферному давлению. Тогда ртутный запор открывается, и продолжается приливание ртути в сосуд до тех пор, пока она не наполнит всего яйцевидного сосуда и верхняя часть ртути займет определенное положение в капиллярной трубке, а именно до метки, на ней находящейся. После этого температура ванны в несколько приемов регулируется до нормальной, причем необходимо убедиться по определению положения ртути в капиллярной трубке, приняла ли ртуть температуру, показываемую термометром, что узнается по тому, что при этом ход температуры и уровня ртути в капиллярной трубке будет одинаков.[1] Когда это достигнуто, тогда над ртутью яйцевидного сосуда оставляется воздух или другой газ под тем наибольшим давлением, с которого желательно начать определение. В большинстве первых наших опытов с прибором *n*° 4 такое начальное давление было около 650 мм. Мы взяли давление, несколько удаленное от 760 мм., по той

[1] Если же ртуть теплее ванны, то в капиллярной трубке будет падение уровня (на каждую сотую градуса около 3,5 мм.), а термометр будет повышаться.

причине, что желали иметь возможность легко обращаться с запором и в первых рядах опытов дойти до давлений сравнительно малых. Если бы мы взяли такой объем газа, который равняется одному килограмму ртути под давлением в 760 мм., то, выпустив всю ртуть, мы имели бы окончательное давление, близкое к 17 мм.; тогда же, когда первоначальное давление было 650 мм., окончательное давление было около 14 мм. Сверх того, предварительные опыты показали нам, что близ атмосферного давления нет значительных отступлений от Мариоттова закона; даже и около 650 мм. отступления весьма малы. То исходное наибольшее давление, которое было оставлено вначале, назовем теперь чрез H_0. Когда яйцевидный сосуд наполнен ртутью до метки, необходимо было уже довести давление приблизительно до H_0 для того, чтобы знать, какое давление действует на ртуть при ее выливании. Это требует объяснения. Положим, что яйцевидный сосуд наполнен до метки, находящейся в капиллярной трубке, при давлении H_1 и что затем из него вылито некоторое количество V ртути и тогда оставлен воздух под давлением H_2. Очевидно, что вся вылившаяся ртуть не будет выражать того объема, который занимает газ в сосуде, начиная от метки, потому что при изменении давления от H_1 до H_2, сосуд изменился в своем объеме, а именно, если H_1 было больше H_2, то сосуд сжался, и следовательно емкость его стала меньше; а потому объем, занятый газом, будет равен не V, а $V - K(H_1 - H_2)$, где K означает изменение ёмкости сосуда при перемене давления на 1 мм. Если же H_1, то-есть то давление, при котором яйцевидный сосуд наполнен ртутью, будет равно H_2, то тогда объем газа прямо выразится весом вылитой ртути, и если с этим объемом должно будет делать поправку, то только по отношению к температуре газа и к изменению ёмкости сосуда вследствие выливания ртути; ибо в том случае, когда сосуд был наполнен ртутью до метки, давящий столб ртути был выше, чем в том случае, когда часть ртути уже вылита. Итак, в тот момент, когда яйцевидный сосуд наполнен ртутью до метки и начинается выливание для определения объема газа, необходимо заметить то давление, какое действует на ртуть, помещенную в сосуд, потому что эта величина необходима для введения дальнейших поправок.

Когда желаемое количество ртути вылито из яйцевидного сосуда, воздух или другой газ заменяет вылившуюся ртуть, если для этой цели тогда запор по временам открывается. Затем он запирается, а в том пространстве, которое окружает запирающую капиллярную трубку, давление возвышается для того, чтобы ртуть в запоре дошла до метки, исправляется положение ртутного мениска в манометрической трубке, регулируется температура ванны и замечается давление, устанавливая две катетометрические трубы, одну на верхний, а другую на нижний мениск ртути в бароманометре. В таком положении прибор оставляется на некоторое время, дабы убедиться в том, что воздух, заключающийся в приборе, принял надлежащую температуру, что будет видно по тому, что тогда положение ртути в бароманометре не будет меняться.

Когда такое равновесие температуры достигнуто, делается отчет трех термометров: 1) того, который находится в водяной ванне, где помещается яйцевидный сосуд, 2) того, который погружен во ртуть и показывает температуру ртути в манометре и 3) того термометра, который находится близ манометрической ветви в сосуде с воздухом и показывает температуру воздуха, вне ванны находящегося, над ртутью в манометрической ветви. После того производится компарация для определения высоты ртути в бароманометре по отношению к манометрической шкале (метру), температура которой на особом термометре также отчитывается. Записывалось также и время наблюдения, дабы следить за могущими происходить изменениями.

Затем, для определения объема воздуха, вне ванны находящегося, отчитывается положение верхней части мениска в манометре по отношению к некоторой неподвижной точке манометрической трубки, то-есть по отношению к той метке, до которой предварительно определялась в манометре емкость, как было сказано на стр. 213[=222]. Если положение ртутного мениска в манометрической трубке весьма близко к метке, находящейся на этой трубке (что особенно легко достигается тогда, когда вместо метки имеется острие), чего и стремились мы каждый раз достичь, то окулярным микрометром нижней трубы прямо отчитывается положение метки. Если оно известно, то в следующих наблюдениях иногда этот отчет и не производится; но по временам он повторяется, так как относительные высоты трубы и метки манометра могут меняться вследствие перемен температур тех опор, на которых они стоят. Пусть, например, положение верхней части мениска отвечает центральной нити нижней трубы, а ее положение соответствует 983-му делению микрометра. Если нить микрометра навести теперь на метку, то, положим, она показывает 727-е деление микрометра. Очевидно (стр. 202[=507]), что метка находится ниже верхней части мениска на 156 делений микрометра. Переведем по имеющейся таблице предварительных определений это число делений в доли миллиметра и узнаем тогда, на какую долю миллиметра ртуть стоит выше метки. Следовательно, воздух при этом занимает объем, меньший, чем в том случае, когда ртуть стоит на метке, а следовательно из объема, отвечающего метке, должно вычесть тот объем, который отвечает измеренной микрометром высоте ртути над меткою. Очевидно, что предварительно необходимо знать, сколько граммов ртути вмещается в каждый миллиметр высоты манометрической трубки близ метки, а также и объем воздуха между метками. Таким же образом, только гораздо проще и с меньшими предосторожностями определяется объем воздуха, заключающегося в запоре, для чего отчитывается положение ртути над меткою в запирающейся капиллярной трубке.

Когда все эти отчеты сделаны, выпускается еще новое количество ртути из яйцевидного сосуда, температура ванны опять регулируется, положение ртути в манометре и запоре также подвергается регулированию и вновь производятся такие же точно отчеты, как и в предшествовавшем определении.

Исходя от начального давления H_0, малому изменению в объемах, то-есть малым количествам ртути, вылившейся из яйцевидного сосуда, отвечают значительные перемены в давлениях, а по мере уменьшения давления эти перемены на то же количество ртути будут все меньше и меньше. Мы видоизменяли различным образом количество выливающейся ртути, но в большинстве наших опытов руководствовались тем, чтобы последующее давление было приблизительно вдвое менее предшествовавшего, особенно в том случае, когда измерялись малые давления; в том же случае, когда измерялись давления, близкие в атмосферному, нередко количество ртути регулировалось так, чтобы давление изменялось от одного определения до другого на 100 или 200 мм. Таким образом, выливание всей ртути, заключающейся в яйцевидном сосуде, разделялось на 4—10 отдельных отливаний, дабы иметь 4—10 определений, составляющих ряд, в котором масса воздуха оставалась одна и та же. Когда доходили до наибольшего объема, то-есть до наименьшего давления, то мы обыкновенно оставляли до следующего дня прибор в том виде, в каком он был при последнем выливании, а на следующий день доводили температуру ванны вновь до первоначальной и наблюдали, не изменяется ли давление. Оно бы возросло, если бы прибор пропускал или если бы из ртути или от стенок нечто отделялось. Те из первых проб, в которых замечено было изменение, не превышающее однако несколько сотых миллиметра, служили только для того, чтобы окончательно высушить ртуть и стенки сосуда. Для цели высушивания после того впускался очень медленно сухой воздух, вновь производилось выкачивание и вновь впускался сухой воздух, что было повторено раз 6 последовательно. При самом начале исследований, когда было сделано полное высушивание, мы дошли до того, что давление (в 1—2 мм.) оставалось неизменным при неизменности температуры в пределах погрешности наблюдения: ни по истечении суток, ни после двух или трех, даже в одном определении после семи суток не было заметно никакого изменения в давлении, что дает ручательство за то, что в приборе не было ни малейших пропускающих мест, и за то, что элемент времени не играет здесь никакой особенной роли. В этом отношении мы однако нередко (но не всегда) замечали небольшое (в 2—3 сотых) увеличение упругости, спустя некоторое время после выпускания ртути. Это объясняется, может быть, тем, что температура и уровни в манометре не сразу устанавливаются или тем, что при расширении газ, заключенный в приборе, охлаждается, а затем, когда выливание ртути прекратится, он постепенно нагревается и доходит до той температуры, которую имеет ванна и термометры. Напрасно было бы описывать здесь множество случайностей, которые препятствовали неоднократно желаемой и достигнутой затем точности наблюдений. В особенности много времени утрачено было нами для преодоления некоторых мелких препятствий, мешавших точности наблюдений. Так, например, чугунный сосуд бароманометра первоначально пропускал воздух, вследствие чего при малых давлениях воздух входил в сосуд бароманометра, а оттого ртуть в этой части прибора не имела совершенно постоянного положения, как в барометрической,

так и в манометрической ветвях; она постоянно, хотя и весьма медленно, поднималась. Только с большим трудом достигли мы того, чтобы сделать чугунный бароманометрический резервуар совершенно непроницаемым для воздуха. По этой причине при дальнейшем устройстве приборов чугунные резервуары заменены стеклянною трубкою.

Нет никакой пользы приводить полные данные для всех рядов наблюдений над воздухом, водородом и углекислым газом, сделанных М. Л. Кирпичевым и мною при помощи описанного прибора *n*° 4, потому что, как будет вслед за тем развито, я решился, несмотря на относительное достоинство чисел, полученных в приборе *n*° 4, устроить еще более совершенный прибор, с которым предположено произвести более точные и полнейшие определения. Первые опыты с устроенным мною прибором *n*° 5 уже сделаны М. Л. Кирпичевым и по ним оказываются результаты, согласные в общих чертах с полученными ранее, но еще более удовлетворительные, чем те, которые добыты при помощи прибора № 4. Тем не менее, необходимо привести полные данные для одного из рядов наблюдений, сделанных с воздухом, дабы показать способ добычи результатов и свод всех поправок, примененных нами. Приведенные затем результаты некоторых сделанных определений показывают только примеры многих данных, бывших в нашем распоряжении после опытов с вышеописанным прибором *n*° 4, когда мы решились высказать вывод, помещенный в отчетах С.-Петербургской Академии Наук.

§ 88

При производстве определений в приборе *n*° 4 пришлось неоднократно заменять манометрическую трубку бароманометра, не только ради поправок, но и потому, что приходилось определять весьма неодинаковые давления (сперва от 650 до 1 мм., потом от 500 до 1000 мм.). Такая замена производилась, не трогая самого барометра, а только разбирая мастичное закрепление манометрической трубки. При этих переменах однажды была заменена одна манометрическая трубка другою и каждый раз переменялись мастичные смычки, соединяющие манометр с капиллярною трубкою яйцевидного сосуда и с ртутным запором, а потому после каждой такой замены объем газа вне ванны между метками (см. § 84) мог меняться и его приходилось вновь определять.

Не стану приводить здесь многие данные прямого калибрования и калибрования, основанного на законе Мариотта (§ 84), служившие для такого определения, потому что способ наблюдений по объемам газа виден в примере, разобранном в следующей главе, а способ калибрования широких и тонких трубок описан в главе VI. Приведу только те средние значения w (при 17°,5) объема вне ванны (между метками), которые были определены, при разных состояниях прибора:

До 25 февраля 1874 г.	$w =$ 29,10	гр. ртути	(по прямой калибрации)
	29,15	„	(по применению закона Мариотта)
	29,04	„	(второй ряд таких же определений)
	принято среднее 29,10	гр. ртути	
До 28 февраля	$w = 68{,}47$	гр. ртути	(среднее по двум методам)
В марте 1874 г. . . .	$w = 68{,}23$	„	(среднее из 3-х данных)
В апреле	$w = 45{,}32$	„	(среднее из 2-х определений)

Емкость одного сантиметра капиллярной трубки запора была от 0,068 до 0,071 гр. ртути. Так как положение метки в запоре было избрано внизу его, то во всех опытах приходилось стояние ртути в запоре выше метки, и потому наблюденное положение ртути в запоре, умноженное на емкость одного деления, приходилось отнимать от вышеприведенного значения w. А как все поднятие ртути в запоре не могло превосходить 65 сантиметров, то вся поправка этого рода не была более — 4,5 гр. ртути. Обыкновенно эта поправка была гораздо менее, потому что соответственным уменьшением давления воздуха в трубке (h), окружающей запор, мы доводили положение ртути до возможной близости к метке, и потому вся величина поправки объема воздуха по положению ртути в запоре была обыкновенно не более 0,5 гр. ртути.

Емкость одного миллиметра манометрической трубки около метки равняется 3,60 гр. ртути. Положение ртути в манометре легко было доводить до того, что оно только на доли миллиметра отличалось от метки (это не всегда делалось), но чаще ртуть не доводилась до метки, а потому тогда поправка объема воздуха w на положение ртути в манометре была положительною. Обыкновенно она в данном ряде опытов оставлялась по возможности постоянною и разность редко была более 7-ми гр. ртути. Для суждения о величине этой поправки служило то данное, которое получалось для определения упругости, а именно отчет трубы катетометра в нижнем ее положении без особого каждый раз нового определения. Пред началом ряда наблюдений труба катетометра устанавливалась неподвижною нитью на метку манометрической ветви и потом переводилась на метр, причем определялось положение метки по отношению к делениям метра. Это определение повторялось после конца наблюдений данного ряда. В каждом же определении давлений должно было по отношению к тому же метру определять положение вершины ртутного мениска в манометре, а потому чрез вычитания в каждом определении было известно расстояние метки от вершины мениска ртути в манометре, что и давало при помножении на 3,60 поправку, о которой теперь идет речь.

Мне остается затем упомянуть о том, что для определения давлений в приборе $n°$ 4 служит все время один барометр, данные для поправки

которого найдены были многократно и приведены в § 49 стр. 120, 121 [=397, 398]. Среднее для постоянного C (см. § 49) из 8-ми опытов, произведенных от декабря 1873 года до марта 1874 года, было = 8,0, а именно от $C = 7{,}3$ до $C = 9{,}2$. Среднее из 3-х определений, сделанных в марте — мае 1874 года дало $C = 11{,}3$, а именно от $C = 12{,}2$ до $C = 10{,}8$. Различие этой поправки произошло от того, что на стенках барометрической трубки остался после приготовления барометра (по способу, описанному в § 41) пузырек (стр. 98[=364]). Во все время производства опытов до марта месяца он оставался на месте, ибо ни разу уровень ртути не был доведен до того места барометрической трубки, где находился этот пузырек. В одном из опытов это случилось и пузырек воздуха, бывший на стенке под ртутью, тогда ворвался в пустоту и увеличил упругость бывшего в ней газа. Лишь только это было замечено, было произведено новое определение упругости оставшегося в пустоте газа и оказалось ясное изменение в величине поправки. Далее, где это прямо не указано, приведены данные для давлений, *исправленные* уже на упругость газа в пустоте. Они исправлены были сверх того по отношению к компарации и к калиброванию метра, о чем будет речь в одной из глав следующего тома.

Данные для давлений не приходилось исправлять на капиллярную депрессию, потому что трубки барометра и манометра имели внутренний диаметр более 18 мм. и все наблюдения производились после отливания [1] ртути (см. § 43), поэтому высоты менисков были малы (обыкновенно менее 1,2 мм.) и всю депрессию от каждого мениска нельзя было считать, судя по имеющимся данным, более 0,04 мм. А как давления двух менисков барометра действовали в обратные стороны, то поправку (разность депрессий от обоих менисков) должно было считать лежащею глубоко в пределах погрешностей наблюдения. Если даже допустить, что один мениск имеет высоту 0,8 мм., а другой 1,4 мм., а такого различия высот никогда не было, то и тогда, судя по таблицам Поля и Шабуса, при диаметре 18 мм., поправка будет 0,029—0,049 = = — 0,020. Не имея уверенности в точности данных, послуживших основанием для вывода таблиц депрессий, и наблюдая в высотах менисков разности, обыкновенно не превосходящие 0,2 мм. (чему отвечает поправка = 0,01), я решился вовсе не делать поправки на депрессию, предполагая в дальнейшем исследовании получить более полные сведения о депрессии в широких трубках. Если от капиллярности и происходила погрешность, достигающая до 0,01 мм., то она конечно лежала в пределах других погрешностей определений и была неравномерна, ибо имела знак в разных случаях не одинаковый, ибо высота мениска в манометрической ветви была то более, то менее, чем в барометрической,[2] а потому нельзя думать, что на результат определений

[1] То же наблюдалось и при определении w на основании закона Мариотта, а потому поправка в w на положение ртути в манометре была производима, принимая во внимание объем воздуха в вогнутой части мениска.

[2] Должно однако заметить, что вообще высота мениска в барометрической ветви, как то замечено и многими другими наблюдателями, ниже, чем в открытой ветви.

погрешность этого рода имела определенное и постоянное влияние.

В определении давлений наибольшей погрешности можно было ждать для температурной поправки, которая возрастает при определении значительных давлений, когда возрастает и ее сомнительность, зависящая от неизбежного [1] неравенства температур верхних и нижних частей ртути в барометре. Один, два или даже три термометра, помещенные подле барометра и окруженные ртутью в трубках того же стекла, как и барометрические, давали понятие о температуре ртути, по коему производилась поправка (то-есть приведение к высоте, при нормальной температуре 17°,5, после исправления показаний термометров), но обыкновенно показания термометров разнились на 0°,2—0°,3, а потому нельзя было быть уверенным в точности средней температуры, по крайней мере на 0°,1.

Если прибавить к этому, что от приближения наблюдателей и лампы, служащей для освещения, от неизбежных перемен температуры помещения и от выливания и приливания ртути температура ее в барометре изменялась и едва ли совершенно одинаково с теми изменениями, которые совершались с термометрами, то надо думать, что в температуре ртути делалась погрешность, достигающая до 0°,2, а может быть и до 0°,3. Если же допустить эту погрешность в температуре, то при высоте ртутного столба в 600 мм. можно было ждать погрешности в 0,03 мм. Замечу однако, что такой погрешности в этом отношении не было, потому что многократно мы продолжали наблюдение над газом при данной упругости несколько часов (и даже дней), не устраняя обычных условий перемены температур, и после поправок не замечали большей разности в давлениях.

Притом температурная поправка в тех опытах, которые ограничивались малыми давлениями, была по существу дела мала и в ней нельзя было ждать большой ошибки. Если давление было 50 мм. и если в температуре ртути допустить невозможно большую погрешность = 1°,0, то и тогда погрешность давления не превосходила 0,01 мм. По этой причине мы особенно умножали опыты при самых малых давлениях и я привожу вслед за сим данные для одного из таких опытов с воздухом, дабы над ним объяснить совокупность поправок, введенных нами в расчет всех данных, полученных с прибором $n°4$. Замечу при этом, что в случае давлений, превышающих 150 мм., мы применяли для компарации (см. § 79) две трубы катетометра, изображенного на рис. VIII-1, а при меньших давлениях только одну трубу, которая тогда передвигалась по стержню катетометра, причем в обоих положениях производилась поправка на установку трубы по уровню. Если определяемые давления были менее 5 мм., то все давление определялось микрометром, причем во всех случаях выдвижка трубы не изменялась, дабы не иметь изменения центрирования и значения долей оборота микрометра.

---

[1] В последнее время я прямыми опытами убедился в существовании погрешности, зависящей от этой причины, и потому окружил ртуть барометров водою. См. следующие главы.

Этого можно было достичь только тогда, когда предварительно с большою тщательностью были установлены на равном (от оси вращения катетометра) расстоянии: метр (а именно его часть с делениями) и центры манометрической и барометрической ветвей.

§ 89

Опыт 20 февраля 1874 года, сделанный мною вместе с М. Л. Кирпичевым, начат был с того, что по прилитии ртути (накануне) и приведении температуры ванны [1] к нормальной, оставлено было над ртутью давление воздуха = 715,54 мм. Тогда ртуть занимала в капиллярной трубке яйцевидного сосуда положение при 36,7 мм. выше метки. А как емкость 1 мм. этой капиллярной трубки равна 0,0161 гр. ртути, избыток ртути (выше метки) = 0,59 гр. Тогда температура ванны была 17°,509. Ртуть была выпущена и вес ее оказался, за вычетом тары и после поправки на разновес, равным 2045,62 гр. Из этого веса должно вычесть 0,59 гр. по той причине, что это количество ртути было выше метки. Таким образом первый вес вылитой ртути = 2045,03 гр. Давление воздуха в приборе при этом было 11,898 мм. по отчету, сделанному тотчас после выпуска и 11,906 чрез час, когда температуры ванны были 17°,516 и 17°,518. Эти давления найдены по компарации с метром, показания которого исправлены: 1) на сличение с нормальным метром, 2) на температуру метра, 3) на калибрацию подразделений.[2] При столь малом, как здесь, давлении поправка этого рода в сумме дала только — 0,002 мм., то-есть величину ничтожную. При компарации служил микрометр, одно деление коего равно было, при имеющемся расстоянии, 0,00462 мм. Когда наблюденное показание было исправлено в отношении к метру, тогда оно должно было быть приведено к температуре 17°,5, принятой за нормальную, ибо термометр барометра показывал сперва на 0°,75, а потом на 0°,98 выше нормы. Поправка была и здесь весьма мала. Затем полученные числа исправлены на упругость газа в барометрической пустоте, а именно поправка была = +0,038 мм. В предшествующих числах уже введены все эти поправки. Таким образом первое наблюденное давление было $p_1 = 11{,}906$. Пред его наблюдением запор был заперт и во время отчета положение в нем ртути было сперва 1,2, а потом 0,8 сант.[3] выше метки. Среднее = 1,0 сант., а потому вне ванны был объем 29,10 — — 0,07 = 29,03 гр. ртути. В манометре положение ртути было на 2,02 мм.

---

[1] Эту температуру указывал термометр n° 37, для коего поправка при 17°,5 равна была (в феврале) —0°,410, а потому 17,° 500 по этому термометру = 17°,190 по воздушному. Все температуры, приводимые далее, даны по термометрам, сличенным с n° 37, и исправлены по отношению к нему, а не к воздушному термометру. Поэтому приводимые далее температуры суть температуры по n° 37, а нормальная температура 17°,5 (по n° 37) равна в действительности 17°,190.

[2] Этот метр, называемый *M*, будет далее описан в главе о нормальных мерах и о их калибровании.

[3] Различие этих отчетов отвечает некоторому изменению в упругости воздуха в трубке, окружающей запор.

ниже метки, а потому весь объем вне ванны $= 29{,}03 + 2{,}02 \cdot 3{,}60 = 36{,}30$ гр. ртути. Температура (по термометру $n°$ 22, исправленному по сличению с $n°$ 37) воздуха вне ванны была в двух отчетах (разнящихся по времени, как сказано, на 1 час) 18°,30 и 18°,46, средняя разность от нормы $= +0°{,}88$, а потому если бы объем воздуха, вне ванны находящегося, имел нормальную температуру, то он был бы равен $w_1 = 36{,}30 - 0{,}88 \cdot 36{,}3 \cdot 0{,}00345 = 36{,}19$ гр. Что касается до объема газа, заключающегося в ванне, то он не будет равен исправленному весу вылитой ртути 2045,03 гр. не только потому, что температура его была на 0°,017 выше нормальной (17°,5 по $n°$ 37), что влечет поправку $= -0{,}017 \cdot 2045 \cdot 0{,}00345 = -0{,}14$ гр., но еще и по следующим причинам: 1) Температура ртути при начале выливания была 17°,509, а при наблюдении $= 17°{,}517$, следовательно ртуть, оставшаяся в ванне, при наблюдении занимала бóльший объем, чем показывает вес вылитой ртути, а газ меньший объем. Так как весь яйцевидный сосуд вмещает 45 кило ртути, а вылито 2 кило, то остальная ртуть сосуда (43 кило) расширилась на объем, занимаемый $0{,}00016 \cdot 0{,}008 \cdot 43000 = 0{,}06$ гр. ртути. Следовательно, поправка объема газа $= -0{,}06$ гр. 2) Давление, действующее изнутри на яйцевидный сосуд, от начала выливания до наблюдения изменилось с 715,5 на 11,9 мм., следовательно емкость сосуда уменьшилась на (715,5 — 11,9) 0,0065 гр. ртути, а потому объем, занятый газом, сделался меньше и в этом отношении поправка объема $= -4{,}57$ гр. ртути. 3) Емкость сосуда уменьшилась также от выливания 2-х кило ртути, а именно судя по стр. 220[=533], поправка объема газа в этом отношении $= -1{,}38$ гр. ртути.[1] Поэтому весь объем газа, заключающегося в яйцевидном сосуде, будет:

$$V_1 = 2045{,}03 - 0{,}14 - 0{,}06 - 4{,}57 - 1{,}38 = 2038{,}88$$

Весь объем воздуха в ванне V_1 и вне ее w_1 при нормальной температуре будет:

$$v_1 = 36{,}19 + 2038{,}88 = 2075{,}07$$

А потому исходное произведение из объема на давление будет:

$$p_1 v_1 = 11{,}906 \cdot 2075{,}07$$

Точно так, как получены p_1 и v_1, получены и следующие значения для давлений и объемов:

$p_2 = 1{,}557$ мм. $v_2 = 15\,320{,}6$ гр. ртути [2]
$p_3 = 0{,}663$ „ $v_3 = 29\,364{,}2$ „ „
$p_4 = 0{,}353$ „ $v_4 = 43\,280{,}1$ „ „

[1] Полагая вместе с Реньо, что сжимаемость ртути на каждую атмосферу $= 0{,}0000035$, найдем, что поправка объема газа в этом отношении в нашем приборе не может ни в коем случае превосходить 0,16 гр. ртути, ибо такова была бы поправка, если бы весь сосуд был полон ртути и давление изменилось на целую атмосферу. По малости действительной поправки этого рода величина ее не введена нами в расчет в наблюдениях с прибором $n°$ 4.

[2] Веса вылитой ртути (с поправкою на тару и разновес) были: $P_2 = 13226{,}46$; $P_3 = 14046{,}81$ и $P_4 = 13917{,}47$, а объемы вне ванны: $w_2 = 54{,}83$; $w_3 = 51{,}84$ и $w_4 = 50{,}50$; температуры ванны 17,503; 17,500 и 17,503.

Давления столь малые, как вышеприведенные, были определяемы прямо одним микрометром, причем p_4 было определено 3 раза, а именно: после выпуска ртути, чрез 40′ и чрез 19 часов, и дало числа: 0,357, 0,350 и 0,351 мм. Так как в других рядах опытов, приведенных далее, будет указан только результат наблюдений, то я считаю неизлишним для описываемого опыта привести тот вид, в каком дан свод других опытов, при этом p означают давления, выраженные в миллиметрах ртути при 17°,5, v — объемы газа в граммах ртути при 17°,5, Δ и Δ' — те отступления от Мариоттова закона, для давлений, которые найдены в опыте, если счесть точными определения начального (наибольшего) или окончательного (наименьшего) давления.

	p	pv [1]	Δ [2]	Δ'
Воздух	11,906	24 705	„	— 6,058 мм.
20 февраля	1,557	23 855	+ 0,054 мм.	— 0,560 „
1874 г.	0,663	19 468	+ 0,178 „	— 0,143 „
М. и *К.* [3]	0,353	15 278	+ 0,218 „	— 0,143 „

	p	pv	Δ	Δ
	646,185	66 382	„	— 22,28 мм.
	486,215	66 354	+ 0,205 „	— 16,56 „
Воздух	207,430	66 293	+ 0,280 „	— 6,88 „
10 февраля	155,645	66 286	+ 0,225 „	— 5,15 „
1874 г.	104,805	66 192	+ 0,305 „	— 3,32 „
М. и *К.*	51,628	65 924	+ 0,359 „	— 1,43 „
	16,395	64 467	+ 0,487 „	— 0,09 „
	14,555	64 093	+ 0,523 „	„

[1] Приводя произведение pv, я ограничивался только пятью цифрами, потому что или в давлениях, или в объемах наблюдалось с точностью не более пяти цифр. Поэтому, если произведение заключало более цифр, они отбрасывались.

[2] Если бы закон Мариотта был справедлив, то для данной массы газа, для коей наблюдено высшее давление p_0 при объеме v_0, произведение из всякого другого давления p на объем v будет $= p_0v_0$, а потому $p = \frac{p_0v_0}{v}$. Если есть отступления, то этого равенства не будет. Назовем через Δ — разность $\frac{p_0v_0}{v} - p$, отсюда очевидно, что $\Delta = \frac{p_0v_0 - pv}{pv} p$. Если точно также по окончательному давлению p_1 и объему v_1 определим отступление Δ', то оно очевидно будет $= \frac{p_1v_1 - pv}{pv} p$.

[3] При каждом ряде наблюденийуказа но (*М.* и *К.*), обоими ли нами вместе (мною и М. Л. Кирпичевым) или одним М. Л. Кирпичевым (*К.*) сделан приводимый опыт. Считаю необходимым заметить здесь, что большинство рядов (числом 23), сделанных М. Л. Кирпичевым (с воздухом, водородом и углекислотою) помещены только в его записных книгах, которые в настоящее время (январь 1875 г.) не находятся у меня под рукою по причине тяжкой болезни моего дорогого товарища.

	p	pv	Δ	Δ
Воздух 16 февраля 1874 г. *K.*	649,087	65 783	„	— 17,32 „
	488,149	65 756	+ 0,200 „	— 12,83 „
	202,319	65 637	+ 0,448 „	— 4,96 „
	149,333	65 640	+ 0,325 „	— 3,67 „
	102,560	65 527	+ 0,508 „	— 2,34 „
	50,955	65 200	+ 0,456 „	0,92 „
	16,389	64 302	+ 0,368 „	— 0,07 „
	14,360	64 027	+ 0,394 „	„
Водород 3 марта 1874 г. *K.*	654,42	84 872	„	
	331,56	84 801	+ 0,28 „	
	166,31	84 780	+ 0,18 „	
	84,40	84 753	+ 0,12 „	
	42,39	84 560	+ 0,15 „	
	21,28	84 221	+ 0,16 „	
Водород 5 марта 1874 г. *K.*	75,54	10 449	„	
	37,25	10 435	+ 0,05 „	
	18,53	10 419	+ 0,05 „	
	9,28	10 412	+ 0,03 „	
	4,66	10 411	+ 0,02 „	
	2,34	10 390	+ 0,01 „	
Углекислый газ апрель *K.*	647,32	44 196	„	
	301,27	44 238	— 0,29 „	
	102,51	44 190	+ 0,01 „	
	50,13	44 187	+ 0,01 „	
	20,03	44 052	+ 0,06 „	
	9,99	43 875	+ 0,08 „	
Углекислый газ апрель 1874 г. *K.*	41,25	66 795	„	
	21,07	66 728	+ 0,02 „	
	11,03	66 712	+ 0,02 „	
	6,28	66 373	+ 0,04 „	
	3,08	66 059	+ 0,03 „	
	1,52	65 207	+ 0,04 „	

§ 90

Рассматривая числа, полученные вышеописанным способом для произведения из объемов на давления, можно тотчас видеть, что *с возрастанием давления эти произведения pv, как для воздуха, так и для угольной кислоты и для водорода возрастают, и это возрастание особенно быстро для воздуха при малых давлениях.* Это есть важнейший и *постоянный* результат *всей* предшествовавшей работы, утверждающий и те предварительные наблюдения, которые были сделаны при помощи приборов № 2 и № 3. Если сопоставить этот вывод с теми выводами, которых достиг Реньо для давлений, бо́льших атмосферного, то оказывается, что при малых давлениях, воздух и угольная кислота

меняют способ сжимаемости, а водород сохраняет его. В самом деле, опыты Реньо для воздуха показывают, что этот газ сжимается более значительно, чем следует по закону Мариотта, то-есть при повышении давления объемы уменьшаются быстрее, чем возрастают давления. Следовательно, для воздуха произведение из давления на объем уменьшается по мере возрастания давления. Проще и точнее всего это можно выразить, сказав, что производная от pv, взятая по отношению к давлению, то-есть $\frac{d(pv)}{d(p)}$, есть величина отрицательная (<0) для воздуха и угольной кислоты, по наблюдениям Реньо для давлений, бо́льших, чем атмосферное; для водорода же величина эта есть положительная $\left(\frac{d(pv)}{d(p)}>0\right)$. Наблюдения же, сделанные сперва мною одним, потом мною и Кирпичевым и наконец одним Кирпичевым при вводе [1] таких поправок, каких до сих пор и не вводили в данные подобных наблюдений, дают для самых малых давлений, во всяком случае меньших, чем атмосферное давление, для всех трех газов $\frac{d(pv)}{d(p)}>0$, то-есть то, что Реньо нашел для одного водорода.

В тесных пределах изменения давления, довольствуясь первым приближением, можно выразить совокупность данных, полученных Реньо для большинства газов линейным уравнением вида

$$pv = 1 - ap. \qquad (N)$$

Это выражение мы обозначим буквою N потому, что такой вид сжимаемости найден Реньо для азота, равно как и для воздуха, угольной кислоты, сернистого газа и др., и только для водорода найдена сжимаемость меньшая, чем следует по Мариоттову закону. А потому в тесных пределах сжимаемость водорода может быть выражена уравнением вида:

$$pv = 1 + ap. \qquad (H)$$

Не имея прямого повода, как видно из рассмотрения, помещенного в главе I-ой, сомневаться в надлежащей точности выводов Реньо, найдя, что воздух при малых давлениях сжимается по выражению (H), а не по выражению (N), как при высших давлениях, я видоизменял способ наблюдений и их отчетливость, пока не убедился в том, что в наших числах нет никакой причины к сомнению относительно применимости для воздуха выражения (H), а не (N). В самом деле, те посторонние обстоятельства, которые могли бы влиять, сколько то известно, на точность определения сжимаемости, все клонятся к тому, чтобы сжимаемость определялась при уменьшении давления выражением (N), а не (H). Рассмотрим некоторые из этих обстоятельств.

[1] Должно, однако, заметить, что если не вводить поправок на объемы, какие введены мною, то положительные отступления будут почти те же, какие получаются после поправок, ибо они составляют малую долю объема.

Можно предположить, что результат наблюдений зависит от сгущения некоторой части воздуха на внутренней поверхности прибора. Но, судя по самой сущности дела, необходимо принять, что воздух, сгущенный под некоторым большим давлением, при меньшем давлении будет отделяться от поверхности. Следовательно, при уменьшении давления, масса воздуха, подвергающегося опыту, должна будет увеличиваться, ибо тогда кроме того воздуха, который был в газообразном состоянии при высшем давлении, от стенок отделилась бы еще часть воздуха, бывшего в сгущенном состоянии на стенках сосуда. Если же так, то, так как объем газа возрастает с его массою, то при уменьшении давления объем получился бы больше надлежащего, а следовательно произведение из объема на давление получилось бы больше, чем следует по закону Мариотта. Мы же получали всегда при уменьшении давления уменьшение произведения. Следовательно, если существует сгущение газа на поверхности сосуда, то это обстоятельство только уменьшает быстроту в изменении произведения pv, но никак не может служить для объяснения замеченных нами отступлений, ибо действует в противную от них сторону, то-есть по выражению (N), а не по выражению (H), по которому происходит сжимаемость газов под малыми давлениями. Если бы мы нашли, как нашел Реньо, сжимаемость по выражению (N), тогда можно было бы еще допустить, что причина замеченных отступлений лежит в сгущении газа на поверхности, но для того случая, который в самом деле нам представился, влияние сгущения на поверхности будет только количественное, но на качество отступления (N или H) оно очевидно повлиять не могло.

Рассуждения совершенно такого же рода, как и предшествующие, показывают, что замеченные нами отступления от Мариоттова закона не могут никаким образом происходить и от выделения газов или паров из ртути, ибо, если бы такое выделение существовало, отступления совершались бы по (N), а не по (H). Точно также нельзя предположить, чтобы при уменьшении давления происходило уплотнение химической частицы (например соединения кислорода с азотом), то-есть сокращения объема, потому что все известное в этом отношении заставляет ждать при уменьшении давления разложений, а не соединений. Если бы при понижении давления совершались разложения, тогда бы объем увеличивался и, следовательно, происходили бы уклонения по (N), а не по (H), как в наших опытах. То же произошло бы, если бы прибор был не герметичен. Словом, если бы мы нашли отрицательные отступления (N)—можно было бы их объяснить сгущением газов на твердых телах, растворением, диссоциациею и т. п. причинами, но для объяснения положительных (по H) отступлений эти причины непригодны.

Если бы отступления были весьма малы, тогда можно было бы еще сомневаться в том, что они в действительности существуют, и можно было бы предполагать, что они зависят от некоторых неизбежных побочных обстоятельств. Но отступления оказываются для воздуха весьма значительными и *далеко превышающими возможную погрешность наблюдения*. В самом деле, сравнив большинство полученных нами результатов для воздуха и выводя из них средний результат, выражая

притом произведение pv для давления в 650 мм. чрез 1000, мы имеем приблизительно следующие значения [1] произведения pv для меньших давлений:

$p =$	600	мм. и	$pv =$ 1 000
	300	„	999
	100	„	997
	50	„	993
	20	„	977
	10	„	960
	5	„	900
	2	„	850
	1	„	820

Числа эти показывают, что для объяснения замеченных отступлений нужно было бы сделать в определении давлений погрешность столь значительную, которую допустить нет никакого права. В самом деле, погрешность эту можно легко найти, допустив для двух давлений справедливость Мариоттова закона. Если, например, допустим, что при перемене давления от 650 мм. до 10 мм., произведение pv в действительности остается постоянным = 1000, то при 10 мм. давления надо сделать погрешность в 0,40 мм., чтобы объяснить то, что при этом давлении pv вышло = 960, предполагая при этом, что в наблюдении объемов не делается погрешности. Таким образом для объяснения замеченных отступлений от Мариоттова закона нужно предположить, что в давлениях делается погрешность, достигающая по крайней мере до нескольких десятых долей миллиметра, чего нет никакого права предполагать. Притом, если бы наш результат зависел от какой-либо неточности в поправке давлений на упругость газа в пустоте, очевидно нашлась бы некоторая постоянная поправка на давление. Но определяя поправку давления, которую должно было бы прибавить к наблюденному давлению, чтобы удовлетворить закону Мариотта, мы находим ее совершенно различною для каждой пары давлений и для различных газов. Следовательно, такой поправки или некоторой грубой неточности в барометрических отчетах нет никакого права допустить.

Тем менее можно предположить в определении объемов столь большую ошибку, которая могла бы объяснить замеченные нами отступления, ибо введенное мною определение объемов способом прямого взвешивания больших количеств ртути представляет разве самые малые погрешности; а для объяснения, например, того отступления, которое существует при переходе от давления в 650 мм. к давлению в 20 мм., нужно допустить погрешность в объеме, равную 800 граммам ртути, если объем при 650 мм. равен только 1 кило, то-есть должно подозревать такую погрешность взвешивания, которая совершенно не мыслима даже при самых грубых наблюдениях.

[1] Для вывода этого послужили мне как выше приведенные, так и все другие сделанные с воздухом наблюдения. Вывод этот, однако, может измениться при более точных наблюдениях довольно значительно.

Если бы замеченные нами отступления происходили от накопления суммы погрешностей разного рода: в давлениях, в объемах, в ёмкости воздуха, вне ванны находящегося, в температурах и т. д., то тогда никак нельзя было бы ожидать той правильности результатов, которая оказывается во всех рядах наблюдений, полученных с помощью прибора $n°$ 4. Эта самая правильность и есть ручательство того, что грубых ошибок нет и что наблюдения заключают в себе условия точности, необходимые для определения малых величин, играющих здесь важнейшую роль.

Что касается до незначительности уклонений водорода и углекислого газа, то считаю необходимым заметить, что число наблюдений (по 5 рядов) для этих газов гораздо менее, чем для воздуха. Для него всего сделано 32 полных ряда наблюдений, из коих 21 не заключает таких родов погрешностей, которые были бы очевидны и заставили бы сомневаться в результате. Из остальных 11-ти 8 сделано в приборах $n°$ 2 и 3, а 3 ряда (в приборе $n°$ 4) должны быть брошены по причине очевидной их неправильности, зависящей от каких-либо случайных погрешностей наблюдения или записи.

§ 91

Прилагая к наблюдениям, произведенным с прибором n° 4, те начала для определения погрешностей объемного способа, которые развиты в § 24, мы можем составить понятие о той мере погрешностей, какую можно ждать в наблюдениях при малых давлениях. Припомним, что чрез

x_1	мы	называем	погрешность,	возможную	в	$\frac{V_0P_0 - V_1P_1}{V_1P_1}$
t	„	„	„	„	„	температуре газа (17,5°)
t_1	„	„	„	„	„	температуре ртути в манометре
(vm)	„	„	„	„	„	объеме,
p	„	„	„	„	„	давлении,

а по стр. 53[=309] (IX) очевидно, что

$$x_1 = 0{,}0073t + 0{,}00036t_1 + (vm)\left(\frac{1}{V_0} + \frac{1}{V_1}\right) + \left(\frac{p_0}{P_0} + \frac{p_1}{P_1}\right).$$

Допустим даже, что в температуре относительно газа мы делаем погрешность в $0°{,}01 = t$, в температуре ртути в манометре примем ее даже $= 0°{,}5 = t_1$; примем затем, что средняя погрешность в объеме достигает до 0,5 грамма ртути $= (vm)$ и что погрешность в давлениях, бóльших 20 мм., доходит до 0,05 мм. $= p_0$, а в давлениях, меньших 10 мм., достигает до 0,02 мм. (эти величины, должно думать, значительно превышают действительно возможные погрешности), то все-таки нельзя

будет и при таких погрешностях объяснить замеченных отступлений. Так в опыте 20 февраля мы получили:

Давление [1]		Произведение	$\frac{P_0V_0 - P_iV_i}{P_iV_i}$	Возможная погрешность	Отношение этих величин
$P_0 =$ 11,91 мм.		$P_0V_0 =$ 24705	0,000	—	
$P_i =$	1,56	$P_iV_i =$ 23855	0,031	0,015	2
	0,66	19468	0,268	0,032	7
	0,35	15278	0,616	0,059	10

Итак наблюденные отступления от двух до 10 раз превосходят наибольшую возможную погрешность наблюдения.

Что касается до вероятной погрешности опытов, происходящей от обстоятельств, которых изменения не известны, то достаточно сличить данные 10 и 16 февраля, чтобы видеть, что эта погрешность довольно значительна, и вот по этой причине я и предпринял еще новые наблюдения, желая увеличить, на сколько позволят обстоятельства, степень точности опытов.

Итак, замеченное нами уменьшение в произведении PV с уменьшением давления не может быть удовлетворительно объяснено никаким другим предположением, кроме того, что в действительности газы, при разрежении их, изменяют свою упругость по выражению (H), а не по закону Мариотта, и тем более не по выражению (N). Если же так и *если считать наблюдения Реньо совершенно точными*, то необходимо принять, что сжимаемость таких газов, как воздух и угольная кислота, подвергается близ атмосферного давления изменению такого рода, что при давлениях выше атмосферного она выражается уравнением (N), а при давлениях меньше атмосферного она подчиняется выражению (H). Только для водорода, как выше, так и ниже атмосферного давления, сжимаемость выражается общим уравнением (H). Дабы подтвердить справедливость этого заключения, необходимо, с одной стороны, проверить наблюдения Реньо при давлениях выше атмосферного, а с другой — близ атмосферного давления произвести более точные наблюдения. Это и составляет один из предметов исследований, отчет о которых будет далее изложен. Но прежде чем перейти к этому, я счел не только полезным, но даже необходимым улучшить еще более способ исследования при давлениях менее атмосферного главным образом по следующим соображениям: 1-е, прибор $n°$ 4 не допускает возможности производства точных исследований при очень малых давлениях, потому что тогда вся измеряемая высота ртутного столба весьма мала, и относительная погрешность в определении давлений будет велика, а следовательно и погрешность PV значительна. Поэтому желательно было так направить устройство прибора, чтобы можно было при малых давлениях определять их изменения не высотою ртутного столба, а

[1] Объем $V_0 = 2075$ гр. ртути, а остальные объемы: 15320, 29364 и 43280.

столбом масла или другой более легкой нелету
которой допускает и при малых давлениях большую степень точности. Так, например, заменив ртуть нефтяным маслом, которое, примерно, в 16 раз легче ртути, мы бы могли определять давления с точностью, в 16 раз превышающею точность определений, производимых при помощи ртутного столба. 2-е. В нашем манометре при приборе $n°$ 4 количество воздуха, находящегося вне ванны (w), было относительно велико. По этой причине, первоначальный объем воздуха в ванне не мог быть мал, а следовательно при выпуске всего количества ртути из яйцевидного сосуда нельзя было достигнуть очень малых давлений, исходя из первоначального значительного давления, и чтобы дойти до малых давлений, нужно было исходить из сравнительно малых же давлений и, следовательно, усложнять дело. Манометрическую трубку желательно было устроить так, чтобы в ней над уровнем жидкости был малый объем газа. Взяв ртутный манометр для определения, этого сделать нельзя, потому что для этого пришлось бы взять узкую трубку, а тогда капиллярное давление значительно изменяется при различных возможных высотах мениска. Заменяя же ртуть нефтяным маслом можно взять сравнительно узкую трубку, потому что для нефтяного масла изменение капиллярного давления при данном диаметре трубки ничтожно мало. Если же взять узкую манометрическую трубку, можно оставить в манометре, то-есть вне ванны, малый объем воздуха; а тогда при исходном наибольшем давлении, можно взять сравнительно малый объем воздуха и, следовательно, при выливании всей ртути из яйцевидного сосуда, можно достигнуть до разрежения весьма значительного. 3-ье. Правильность результатов, достигнутых с помощью прибора $n°$ 4, много зависит от того обстоятельства, что здесь не было нужды как другим наблюдателям, отчитывать не только высоту ртути в манометре, но и высоту ртути в барометре: наш бароманометр представляет соединение этих двух приборов, притом с постоянным или почти постоянным объемом газа, находящегося в манометре, то-есть вне ванны. Для дальнейших улучшений дела желательно было бы только так устроить бароманометр, чтобы и объем пустоты в барометрической трубке при разных давлениях оставался один и тот же. Для этой последней цели, сохраняя то условие, чтобы объем воздуха в манометрической трубке был бы постоянен и стояние в манометре ртути также постоянно, необходимо было прибегнуть к пособию второго барометра, торичеллиева пустота которого была бы в сообщении с пустотою бароманометра. Тогда, изменяя количество ртути в этом втором добавочном барометре, можно достичь того, что объем общей пустоты обоих барометров будет во всех наблюдениях один и тот же, а тогда и поправка на упругость газа, оставшегося в барометрической пустоте, будет постоянною. Хотя бы она и была велика, она, как величина постоянная, могла бы быть рядом предварительных наблюдений найдена со всею желаемою и возможною степенью точности. Если с помощью такого прибора определить давление и найти произведение pv, то, если бы и сделана была погрешность в давлениях, она была бы всегда в действительности одна и та же, следовательно, опять могла

бы быть найдена непосредственно из ряда наблюдений для определения сжимаемости газов. 4-е. Кроме этого, желательно было так видоизменить устройство прибора, чтобы придать ему еще бо́льшую легкость манипуляций, чем в приборе $n°$ 4, обращение с которым требовало постоянной внимательности и все-таки представляло нередко затруднения.

Дойдя до этих требований, родившихся вследствие продолжительного обращения с прибором $n°$ 4, я построил прибор $n°$ 5, описываемый в одной из следующих глав. Числа, добытые при помощи улучшенного прибора, я приведу вполне, потому что здесь устранены все поводы для какого-либо сомнения относительно возможной точности наблюдений. Наблюдения же, сделанные с прибором $n°$ 4, я рассматриваю как качественные наблюдения, показавшие и подтвердившие существование положительных отступлений от Мариоттова закона для разреженных газов.

§ 92

Сущность способа наблюдений и главнейший результат, достигнутый при помощи описанного выше прибора, были сообщены от имени моего ~~и~~ моего товарища М. Л. Кирпичева в мартовских заседаниях Химического и Физического Обществ и в апреле 1874 года в С.-Петербургской Академии Наук. После того в апрельском и майском выпусках анналов Поггендорфа, появилась статья шведского ученого Зильештрёма, касающаяся того же самого предмета, который занимал нас столь долгое время. Способ наблюдений, употребленный Зильештрёмом для определения сжимаемости воздуха, угольной кислоты, кислорода и водорода, состоял в следующем:

В ванне со льдом помещаются два латунных цилиндра, оба высотою 247 мм. Один, который назовем, вместе с автором, чрез A, имел диаметр в 117,5 мм., а другой сосуд B имел в диаметре 80,28 мм. Толщина стенок и плоских латунных крышек у обоих сосудов была от 4,8 до 6,6 мм. Эти сосуды A и B соединяются между собою тонкою металлическою трубкою с краном R, вне ванны находящимся. Сосуд A, сверх того, соединен с открытым манометром, диаметр которого равен 4,8 мм. Сосуд B соединяется с насосом при помощи трубки, снабженной краном. Каждый ряд опытов состоял из следующих операций. Сперва кран R, сообщающий сосуды A и B, закрывается, так что в A оставляется сухой газ под давлением, близким к атмосферному, что и узнается при помощи наблюдений барометра и манометра, сообщающегося с сосудом A. Назовем, вместе с автором, упругость газа, содержащегося в A, чрез E, а объем воздуха, оставшегося в сосуде, чрез V. Из сосуда B выкачивается насосом воздух до возможной меры, так чтобы в нем осталось малое давление e, которое измеряется или особым манометром, при сосуде B находящимся, или манометром при воздушном насосе. Упругость воздуха, остававшегося в B, в опытах Зильештрёма, была $> 0{,}9 < 3{,}5$ мм.; в большинстве случаев она была около 2 мм. Тогда кран r, сообщающий B с насосом, запирается, кран R отворяется, и наблюдается упругость E_1, которую имеет газ, распределяющийся

теперь в обоих сосудах. Объем, занимаемый газом до открытия крана R, будет равен V + объем воздуха, вне ванны находящегося, в манометре. Мы не станем затем обращать внимания, при рассмотрении опытов Зильештрёма, на то различие в объемах воздуха, которое происходило в опыте от различного положения ртути в манометре, потому что будем разбирать затем только выводы из опытов, а при их получении введена уже поправка на объем воздуха, находящегося вне сосуда, то-есть в манометре. Точно также не станем обращать внимания и на упругость e того воздуха, который оставался пред открытием крана R в сосуде B, потому что и в этом отношении результат освобожден от влияния величины e. Заметим только, что по самому существу дела необходимо было бы предварительно знать изменение сжимаемости воздуха под малыми давлениями, чтобы произвести точную поправку на влияние того газа, который остается в сосуде B. А так как сжимаемость при малых давлениях вообще трудно определяется, то в методе Зильештрёма имеется коренной недостаток, состоящий именно в том, что при малых давлениях e принимается справедливым Мариоттов закон и на основании этого допущения делается поправка. По этой одной причине метод Зильештрёма не может внушать большого доверия. При поправке полученных результатов в отношении к количеству воздуха, находящегося вне ванны, Зильештрём упустил из виду то обстоятельство, что газ, вне ванны находящийся, имеет другую температуру, чем воздух сосуда. Правда, что объем вне ванны находящегося газа сравнительно с объемом сосудов был очень мал; но это было достигнуто только при помощи того, что манометрической трубке был придан весьма малый диаметр. А при таком малом диаметре (4,8 мм.) капиллярная погрешность от различия в форме менисков обеих ветвей манометра должна быть весьма значительною. Можно было бы видоизменить опыт Зильештрёма таким образом, что взять манометрическую трубку значительного диаметра и соблюдать в ней постоянный уровень ртути, подобно тому, как мы делали в наших опытах. Тогда объем газа, вне ванны находящегося, был бы всегда приблизительно один и тот же, и можно было бы его сделать сравнительно малым, не рискуя вводить капиллярную погрешность. Эта последняя должна была в опытах Зильештрёма быть значительною не только потому, что диаметр манометра был мал, но еще и по той причине, что ртуть, употребленная для манометра и барометра, была нечистою; в самом деле она имела плотность 13,5825, вместо 13,5959, какую имеет чистая ртуть; а ртуть нечистая представляет значительные неправильности в образовании мениска. Сверх того, в опытах Зильештрёма для отчитывания употреблена была шкала и определение высот производилось без помощи катетометра. Кроме того, так как каждое наблюдение необходимо было сопровождать отчетом барометра и этот последний также отчитывался без помощи катетометра, то по этим причинам, конечно, в опыты Зильештрёма входили значительные погрешности прямого отчета давлений, увеличенные притом двукратным отчитыванием манометра и барометра. Таким образом, в методах наблюдения Зильештрёма есть причины для неточности данных, что видит и сам автор

и что лишает его результаты той степени отчетливости, какая требуется в наблюдении столь малых отступлений, какие существуют для газов под давлениями меньшими, чем атмосферное. По этой то причине Зильештрём и назвал свои опыты предварительными и высказал желание видеть их воспроизведенными при условиях большей точности. Ему было тогда, конечно, неизвестно, что опыты этого рода были нами в то время уже сделаны и публикованы.

Вывод, достигнутый Зильештрёмом по отношению к четырем вышеназванным газам, представляет, однако, довольно значительное однообразие и состоит в следующем:

1) Если назовем чрез E, как сказано выше, упругость газа в сосуде A пред открытием крана R, а чрез E_1 упругость газа после открытия крана R, чрез V объем сосуда A и чрез V_1 объем сосуда B, то в опытах определялось каждый раз отношение $\frac{E}{E_1}$, и это отношение оказалось для всех газов и при разных давлениях больше, чем отношение $\frac{V+V_1}{V}$. Если бы закон Мариотта был точен, то эти отношения были бы всегда равны, потому что

$$EV = E_1(V + V_1)$$

Откуда $\frac{E}{E_1} = \frac{V+V_1}{V}$. В опытах (после исправления полученных данных), непосредственно наблюдалось только отношение $\frac{E}{E_1}$, величина же $\frac{V+V_1}{V}$ оставалась во всех опытах (почти) постоянною. Это последнее отношение, как среднее число из многих измерений (l. c. стр. 452), было 1,46859. При высших давлениях, а именно от 760 мм. до 350 мм. (избираем эти данные потому, что в них наименее погрешности) получено было отношение $\frac{E}{E_1}$,

для воздуха	1,47209
„ кислорода	1,47260
„ угольной кислоты . . .	1,46946
„ водорода	1,47250

Следовательно, для всех газов получено отношение $\frac{E}{E_1}$ больше, чем наблюденное значение $\frac{V+V_1}{V}$. Зильештрём полагает однако, что сделанные им определения отношения $\frac{V+V_1}{V}$ заключают в себе неточность, достигающую до $^1/_{400}$; а именно, он считает, что истинное отношение $\frac{V+V_1}{V}$ для его сосудов было более, чем 1,472, а потому принимает, что в его опытах значение $\frac{E}{E_1}$ было меньше, чем

$\frac{V+V_1}{V}$. Такое допущение, сделанное Зильештрёмом, не имеет никакого фактического основания. Если автор предполагает определенную и значительную погрешность в тех из многих измерений, которые служили ему для определения объемов, то он мог проверить эти определения, непосредственно взвешивая свои сосуды A и B пустыми и наполненными водою. Ныне же, когда мы имеем только одно число 1,46859 для $\frac{V+V_1}{V}$, как прямой результат опытов, мы не имеем права заменять это число каким-либо другим. Мы увидим далее, что причина вышеназванного допущения, сделанного Зильештрёмом, основывается на ошибке его соображений и покажем, что второй фактический вывод не позволяет никоим образом сделать того допущения, к какому, вследствие ошибки рассуждения, прибег Зильештрём, то-есть заставляет утверждать, что отношение $\frac{V+V_1}{V}$ никоим образом не может быть равно 1,472 и во всяком случае меньше, чем 1,47. Итак, первый прямой *вывод опыта* состоит в том, что полученное отношение упругостей $\frac{E}{E_1}$ больше, чем отношение объемов $\frac{V+V_1}{V}$.

2) Когда сосуд A был наполнен газом под давлением атмосферным и когда затем было получено меньшее давление E_1, при открытии крана R, тогда кран этот запирается, из сосуда B выкачивается воздух, кран r затворяется, и после того отворяется кран R и наблюдается вновь уменьшенное давление, которое к наблюденному выше давлению E_1 стоит в таком же отношении, в каком E_1 стоит по отношению к первоначальному давлению E, бывшему в сосуде A. Таким образом, из наблюдения упругости, произведенной после первого разрежения и из наблюдения упругости после второго разрежения (производимых в B), получается вновь отношение $\frac{E}{E_1}$, которое отвечает меньшей упругости. Если закон Мариотта справедлив, то вновь полученное отношение должно было бы быть равно первоначально полученному отношению; если же существуют отступления, то при уменьшении давления отношение $\frac{E}{E_1}$ будет или увеличиваться, или уменьшаться, по мере уменьшения давления. Точно так, как второе разрежение воздуха в сосуде B дает новое отношение давлений, то-есть новое данное, так производилось в каждом ряде наблюдений 12 или 13 последовательных разрежений воздуха в сосуде B и наблюдалось отношение давлений $\frac{E}{E_1}$ при этих различных давлениях. Исходя из первоначального давления, близкого к атмосферному давлению, в конце Зильештрём доходил до давлений от 6 до 7 мм. и, следовательно, получал возможность помимо знания истинного значения отношения $\frac{V+V_1}{V}$ определять род отступлений от Мариоттова закона, сравнивая получающиеся отноше-

ния давлений $\frac{E}{E_1}$ при разных начальных давлениях. Не подлежит сомнению, что при объясненной выше недостаточной точности в определении давлений, данные Зильештрёма для малых давлений будут содержать значительную относительную погрешность, и вследствие того в отдельном ряде наблюдений нельзя ждать правильности в изменении отношений $\frac{E}{E_1}$ при уменьшении давления. Это замечает и сам автор, а потому, для устранения этого недостатка, он произвел большой ряд определений и вывел общие средние из многих своих опытов; так, например, для воздуха было сделано 16 рядов наблюдений и в каждом из них от 7 до 14 раз производилось разрежение. Таким образом скопилось большое число данных, относящихся до некоторых пределов давлений. Среднее из данных, полученных для близких давлений, Зильештрём для воздуха сводит в следующую таблицу:

Число наблюдений	Давление в мм.	Отношение $\frac{E}{E_1}$ [1]	Вероятная погрешность
32	от 759 до 352	1,47209	0,000012
32	352 164	1,47165	0,000026
32	164 77	1,46887	0,000065
30	77 37	1,46870	0,000157
29	37 18	1,46122	0,000249
40	18 7	1,46511	0,000514

Для других газов Зильештрём имел меньшее число рядов, так например для кислорода пять рядов, для угольной кислоты три ряда и для водорода шесть рядов. Поэтому вероятная погрешность среднего результата из сравнительно грубых наблюдений Зильештрёма в этом случае будет еще большею, чем для воздуха. Мы сводим средние результаты в такую же таблицу, как они сведены у Зильештрёма для воздуха, и для других газов; а именно таким образом получается:

для кислорода	Давление от 785	до 353 мм.	Отношение $\frac{E}{E_1}$	1,47260
	353	165		1,47016
	165	77		1,47147
	77	18		1,46709

[1] Это отношение Зильештрём везде в своем мемуаре обозначает чрез $\frac{V+V_1}{V}$.

Такое обозначение вредит ясности дела, потому что приводимые числа показывают исправленные отношения давлений, а не объемов. Я думаю, что погрешность вывода, сделанного Зильештрёмом из своих опытов, зависит главнейшим образом от этого ложного обозначения. То отношение, которое существует для давлений, обратно отношению, существующему для объемов газов; а потому, обозначив отношение давлений отношением объемов, можно было, как и сделал Зильештрём, придти к ложному заключению.

угольной кислоты	780	353	1,46946
	353	164	1,47106
	164	76	1,47015
	76	17	1,47109
водорода	775	351	1,47247
	351	162	1,47302
	162	76	1,47258
	76	7	1,46895

Из этих численных результатов Зильештрём выводит то общее заключение, что с уменьшением давления наблюдения дают все меньшее и меньшее отношение давлений $\frac{E}{E_1}$. Этот вывод, как видно из приведенных средних чисел, нельзя считать совершенно несомненным, судя по данным Зильештрёма. Достаточно взглянуть, например, на данные, полученные для воздуха от 37 до 7 мм. или на все данные для угольной кислоты; но в общих чертах, в особенности, если обратить внимание только на высшие давления, от 760 до 150 мм., вывод этот несомненен и составляет важнейший и единственный результат наблюдений Зильештрёма. По справедливости он есть единственный результат, потому что, как мы видели выше, в первом результате опытов $\frac{E}{E_1} > \frac{V+V_1}{V}$ Зильештрём сам сомневается, а на втором результате опытов Зильештрём и основывает все свои позднейшие рассуждения. Мы не будем следить за ходом этих рассуждений, а прямо приведем те результаты, которых достиг при своих соображениях Зильештрём. Они состоят в следующем: 1) все четыре наблюденных газа отступают при давлениях, меньших 760 мм., от закона Мариотта в ту сторону, в которую отступает воздух, по наблюдениям Реньо, для давлений высших, чем атмосферное. 2) Отступления этого рода для угольной кислоты больше, чем для воздуха и водорода, подобно тому как Реньо нашел для угольной кислоты сжимаемость, бо́льшую, чем для воздуха при высших давлениях. Это обстоятельство дает Зильештрёму уверенность в справедливости его вывода, ибо согласует его наблюдения с наблюдениями Реньо. 3) Водород при малых давлениях отступает от закона в ту же сторону, как и воздух при больших давлениях. А так как при значительных давлениях отступления для водорода совершаются в противную сторону, чем для воздуха, то, значит, сжимаемость водорода при переходе от давлений выше атмосферного к давлениям ниже атмосферного претерпевает изменение знака; следовательно, водород близ атмосферного давления следует Мариоттову закону; при давлениях же выше атмосферного водород сжимается менее, чем следует по закону; а при давлениях ниже атмосферного более, чем следует по Мариоттову закону. В подтверждение справедливости этого вывода, Зильештрём приводит то обстоятельство, что для водорода значения отношения $\frac{E}{E_1}$ при давлениях, близких к

атмосферному, близки к принятому им значению отношения $\frac{V+V_1}{V}$. Таким образом, для водорода Зильештрём принимает изменение в сжимаемости близ атмосферного давления. 4) Так как все газы при малых давлениях оказываются, по мнению Зильештрёма, сжимающимися так, как воздух при больших давлениях, то при значительном разрежении, в пределе, газы переходят в эфир, то-есть обладают упругостью без тяжести. А потому нет границы для атмосферы.

§ 93

Вышеприведенные заключения Зильештрёма не только не могут быть приняты по недостаточности поводов для их вывода и по качеству наблюдений, послуживших для них основанием, но и должны быть отвергнуты по той причине, что из численных данных Зильештрёма вытекают заключения, прямо противуположные этим выводам. Далее мы рассмотрим этот вопрос с некоторою подробностью не только потому, что первый вывод Зильештрёма противуположен тому выводу, которого достигли я и Кирпичев, при исследовании воздуха и других газов, но еще и потому, что такое рассмотрение полезно для уяснения сущности тех вопросов, и способов расчета данных, какие должно иметь в виду при обсуждении упругости разреженных газов. Сверх того, при этом рассмотрении есть повод коснуться многих из тех спекулятивных соображений относительно сжимаемости газов, которые в последние годы столь часто встречаются в физико-математической литературе этого предмета. Лучшим примером статей этого последнего рода служат статьи Дюпре (Comptes rendus 1864, t. LIX и в A. Dupré. Theorie mécanique de la chaleur 1869 p. 61) и Будде (Zeitschrift für Mathematik und Physik von Schlömilch 1874. t. 19. p. 186). Для ясности изложения, мы рассмотрим вопрос первоначально в абстракте, исходя из Мариоттова закона.

Закон этот состоит в том, что произведение из объема на давление есть величина постоянная:

$$(M) \qquad PV = c,$$

где c есть величина постоянная. Если существуют отступления от Мариоттова закона, то PV будет величиною переменною, изменяющеюся с переменою давления, а потому отступления от Мариоттова закона могут быть только *двух* родов.

(N) или отрицательные $PV = c - f(P)$,

(H) или положительные $PV = c + f(P)$.

В этих трех формулах (M), (N) и (H) исчерпываются все возможные случаи отношения между объемами и давлениями газов. До сих пор ни в одном точном исследовании не оправдалась формула (M), ни для одного газа и ни для каких давлений. По опытам Реньо оказывается, что сжимаемость воздуха, угольной кислоты, азота и всех других на-

блюденных газов, за исключением водорода, выражается формулою (*N*). Только для водорода при давлениях от 1 до 30 атм. сжимаемость выражается формулою (*H*), отчего я и обозначаю этот последний род отступлений от Мариоттова закона чрез букву (*H*). В 1-й главе этого сочинения мы вывели, что на основании: a) наблюдений над упругостью пороховых газов, b) данных Наттерера и c) всей совокупности сведений о газах и возможной их плотности при отсутствии перехода в жидкость, что все газы при высоких давлениях должны отступать от Мариоттова закона по формуле (*H*). Мы видели там также, что немыслимо предположить для высоких давлений возможность отступления от Мариоттова закона по формуле (*N*) ни для какого газа. Таким образом, соображения, развитые в I-й главе (1872), подтверждаемые опытами, заставляют утверждать, что при высоких давлениях все газы непременно следуют сжимаемости по формуле (*H*). С другой стороны, опыты, описанные в этой главе, показывают, что при давлениях, меньших атмосферного, и воздух, и водород, и угольная кислота представляют отступления от Мариоттова закона также по формуле (*H*), и, следовательно, такие отступления, которые выражаются формулою (*N*) поныне известны с достоверностью только на основании исследований Реньо, для воздуха и других газов при давлениях от одной до 30 атмосфер. Таким образом, если рассмотреть сжимаемость воздуха, то оказывается (по нашим опытам), что при давлениях менее атмосферного сжимаемость воздуха следует формуле (*H*); при давлениях выше атмосферного до 30 атмосфер сжимаемость (по опытам Реньо) совершается по формуле (*N*), а для давлений выше 100 атмосфер (по данным Наттерера и соображениям, развитым в 1-й главе этого сочинения), опять по формуле (*H*). Следовательно, кривая, которою ныне должно выразить сжимаемость воздуха, начиная от нулевого давления до наибольшего возможного, представляет две точки перегиба, одну при переходе от давлений ниже атмосферного, то-есть при переходе от наблюдений, произведенных мною и Кирпичевым, к наблюдениям, произведенным Реньо, и другую точку перегиба для давлений выше 30 атмосфер, то есть при переходе от наблюдений Реньо к наблюдениям Наттерера. Наблюдения Реньо, показывая для воздуха отступления по формуле (*N*), дают повод думать, что воздух при некоторых двух давлениях будет следовать Мариоттову закону, представляя в своей кривой переход от формулы (*N*) к формуле (*H*); а такой переход возможен при сплошности кривой только тогда, когда в месте перегиба кривая эта (может быть в очень узком пределе давлений) выражается формулою (*M*). Что же касается до такого газа, как водород, который и по нашим опытам для давлений меньших атмосферного оказался сжимающимся по (*H*) так же, как и при давлениях от 1 до 30 атмосфер, по наблюдениям Реньо, и для высших давлений по наблюдениям Наттерера, то по отношению к нему немыслима ни одна точка кривой, то-есть никакое давление, при котором этот газ следует Мариоттову закону. Он постоянно изменяется по формуле (*H*). Но до сих пор это только один исключительный случай. Мы видели в § 1-м, что, при всем относительном совершенстве наблюдений Реньо, есть несколько поводов сомневаться в их точности, а

так как они представляются сверх того исключительными для воздуха и всех других газов по сравнению с нашими наблюдениями для давлений меньше атмосферного и по сравнению с наблюдениями Наттерера для давлений высоких, то потребность проверки опытов Реньо становится чрез это обстоятельство более настоятельною. Ныне нет никакого повода думать, что в данных Реньо для воздуха и других газов существуют столь грубые погрешности, что смысл отступлений, замеченных Реньо, не верен; а потому сжимаемость всех газов, за исключением водорода, представляет значительную сложность, так что ее нельзя выразить не только прямою, но даже и кривою низшего порядка, ибо в кривых низшего порядка не может быть, как в кривой, выражающей сжимаемость воздуха, двоякого перегиба. Дюпре, Будде (и многие другие) полагают однако, что ныне известные данные о сжимаемости всех газов могут быть выражены весьма простым образом. Так Дюпре объяснял отступления от Мариоттова закона допущением предположения о конволюмах, то-есть о таком постоянном объеме, который должно прибавлять к единице объема газа, чтобы получить для него применимость Мариоттова закона.[1] Если при P_0 газ имеет объем V_0, а при P_1 объем V_1, то, по мнению Дюпре, сжимаемость выразится точным образом для данной массы газа уравнением

$$P_0(V_0 + q) = P_1(V_1 + q_1),$$

где q есть конволюм, или постоянное число, прибавляемое к объему для объяснения отступлений от Мариоттова закона. Преобразуем предшествующую формулу, приняв при некотором давлении P_0 для взятой массы газа V_0 произведение $P_0(V_0 + q)$ за постоянное, которое и означим чрез c. Тогда получим:

$$(C) \qquad P_1V_1 = c + qP_1$$

это есть не что иное, как упрощение общей формулы (H), где принята неизвестная $f(P) = qP$, а потому понятие о конволюме есть допущение того, что отступления от Мариоттова закона при перемене давлений выражаются линейною формулою (C). А судя по предшествующему, совокупность одних опытов Реньо и Наттерера не позволяет выражать все отступления линейною формулою, прибавив же к ним теоретические соображения и выводы из наших опытов, этого нельзя допустить, не отвергая точности опытов Реньо. Дюпре же и основал свои выводы на наблюдениях Реньо, а потому в понятии о конволюмах нельзя видеть успеха в деле знания законов упругости газов и его должно отвергнуть, как не отвечающее совокупности наших сведений об этом предмете.

Будде старается выразить реальным образом значение конволюма, исходя из того, что размеры атомов имеют измеримую величину по

[1] «Закон конволюмов: при постоянной температуре упругости газовой массы обратно пропорциональны объемам, увеличенным небольшим постоянным c_0v_0. Это постоянное, дополняющее объем, носит название конволюма, когда объем в нормальных условиях есть единица» Дюпре.

отношению к расстояниям самых атомов друг от друга. Сжимаемость газов Будде понимает, как уменьшение пустого пространства, находящегося между газовыми частицами, и чрез то доходит до определения отношения между объемом сферы упругости газовых частиц и объемом пустого пространства, остающего между частицами. При некотором определенном давлении, а именно при давлении 1 метра, он находит для водорода, на основании опытов Реньо и Наттерера, что «при 4° (Ц) и 1 метре давления сферы упругости водорода составляют 0,0007 того объема, который занимает водород». Это заключение есть не что другое, как иной способ выражения понятия о конволюмах. В самом деле, вывод Будде состоит в том, что для водорода PV почти $= 1 + 0{,}0007\,P$ или вообще $PV = 1 + kP$. Это значит, что Будде допускает линейное выражение для формулы (H), то-есть $f(P)$ принимает равною kP. Из выражения для конволюмов вытекает то же самое, как видно по предшествующей формуле (C). Представим себе, что при 1 метре давления взят объем $= 1$. Этот объем состоит из несжимаемых частиц, имеющих объем a и из остального объема $(1 - a)$, который, предположим, сжимается по закону Мариотта. При давлении P объем газа будет очевидно $\frac{1-a}{P} + a$, а потому произведение из объема на давление будет $1 - a + aP$ или $1 + a\,(P - 1)$. Помножая это выражение на некоторую постоянную (например, изменив начальный объем), имеем $PV = c + kP$, то-есть то же выражение для сжимаемости, какое дает и Дюпре с тою разностью, что для Дюпре безразлично, принять ли k за положительную или за отрицательную величину, а здесь она, очевидно, положительна. А как по наблюдениям Реньо воздух и др. газы представляют сжимаемость такого рода, что k есть отрицательная величина, то Будде было необходимо допустить, что упругость газов видоизменяется притяжением атомов, а потому он признает ее зависящею от несжимаемости атомов и от их взаимного притяжения, допуская, что первая, выражаемая линейным уравнением (C), берет вверх над второю при уменьшении объема. Из сего следует, что при увеличении объема, то-есть при разрежении сжимаемость будет выражаться такою формулою, где k есть отрицательная величина. Этого, судя по нашим опытам, нет в действительности, ибо тогда сильнее, чем при высших давлениях, сжимаемость совершается в том же смысле (k положительная), как у водорода по опытам Реньо.

Таким образом, понятие о конволюмах и сферах упругости газовых частиц сводится к одному и тому же допущению линейного выражения для отступлений от Мариоттова закона, т. е. к принятию $f(P)$ равною kP. Такое допущение совершенно не приложимо, на основании разбора существующих данных, не только для воздуха и ему подобных газов, но даже и для водорода. Так, например, тогда совершенно становится непонятною возможность двойного перегиба кривой, отвечающей изменению PV с изменением V; а для воздуха, как мы видели выше, существующие данные заставляют принять два перегиба. Если бы сжимаемость водорода выражалась линейным уравнением $PV = 1 + 0{,}0007\,(P - 1) = 0{,}9993 + 0{,}0007\,P$, как предполагает Будде, то

тогда при $P = 0$ и при давлениях близких к 0, то-есть при малых давлениях, отступления от Мариоттова закона были бы все меньше и меньше и близ самого нуля водород следовал бы почти вполне закону, ибо P мало, а потому PV изменилось бы очень мало. Наблюдения же наши показывают, что при малых давлениях отступления от Мариоттова закона не только не уменьшаются, но еще и возрастают. Из всего сего следует, что поныне признавая справедливость результатов опытов Реньо и Наттерера,[1] нельзя выражать отступления от закона Мариотта простым допущением линейных от него отступлений. Это видно также из того, что для воздуха и др. газов, взяв одни данные Реньо, произведение из объема на давление изменяется не пропорционально изменению давлений. Допустим, что выражение

$$PV = c + kP$$

справедливо для воздуха, и найдем значение $\frac{k}{c}$ по опытам Реньо для воздуха. В этих опытах в каждой серии, когда масса газа постоянна, даны P_0, V_0, P_1, V_1. Очевидно, что при предшествующем допущении:

$$P_0V_0 = c + kP_0 \text{ и } P_1V_1 = c + kP_1,$$

а потому

$$\frac{k}{c} = -\frac{P_0V_0 - P_1V_1}{P_0V_0P_1 - P_1V_1P_0}.$$

Приводимые числа извлечены из данных Реньо для воздуха (Relation etc. I—374, 376 и 378), причем все определения перечислены на одну и ту же температуру 5° и в каждом ряде взяты средние для всех давлений (в метрах), близких друг к другу и полученных при объемах, относящихся между собою приблизительно, как 1 : 2.

Порядок серий	По данным Реньо для 5°				Вычисленное значение $\frac{k}{c}$
	P_0	V_0	P_1	V_1	
1	0,739	1943,9	1,476	972,0	—0,00151
2	2,112	1941,6	4,210	971,6	—0,00125
3	2,069	1941,3	4,127	970,6	—0,00133
4	4,142	1941,3	8,178	980,1	—0,00078
5	4,219	1940,6	8,406	970,6	—0,00082
6	6,770	1941,7	13,473	971,1	—0,00069
7	6,390	1942,6	12,729	970,7	—0,00076
8	9,334	1942,6	18,547	971,7	—0,00066
9	11,474	1948,2	21,057	1055,4	—0,00059

Из этого очевидно, что по данным Реньо $\frac{k}{c}$ для воздуха изменяется почти в три раза при перемене начального давления от 0,7 до 11 ме-

[1] На этом допущении и основана моя статья (1872 г.), вошедшая в I главу этого сочинения; на том же допущении основана и статья Будде (1874 г.), который, подобно мне, видит необходимость признания за опытами Наттерера важного значения, что высказано было мною за два пред тем года.

тров, притом это изменение на столько последовательно, что несомненно происходит не от случайных погрешностей, а от существа дела. Для азота, углекислого газа и особенно для водорода $\frac{k}{c}$ получается, как величина гораздо более постоянная, а потому можно думать одно из двух: или опыты Реньо заключают значительные неточности, но тогда нельзя при помощи их доказывать понятия о конволюмах или сфере упругости, и необходимо их сперва проверить и подтвердить новыми опытами новые понятия; или же, что несомненно должно принять по моему мнению, эти новые понятия должно признать не имеющими ныне фактической опоры. В подтверждение этого весьма важно решить для воздуха вопрос о том: продолжает ли частное $\frac{k}{c}$ при дальнейшем уменьшении давлений (ниже 740 мм., как в 1-м ряде опытов Реньо) оставаться отрицательным и возрастать или уменьшается и меняет закон? Если бы закон сохранялся и возрастание значения $\frac{k}{c}$ продолжалось, то тогда можно было бы, как то делает Будде, построить сложную гипотезу (притяжений и несжимаемости атомов), примиряющуюся с данными, хотя тогда простота дела, о которой идет речь, уничтожилась бы. Если же, как следует по нашим опытам, знак при $\frac{k}{c}$ при давлениях меньших, чем атмосферное, становится положительным, то тогда и усложненная гипотеза Будде (и др.) не приложима для выражения сжимаемости воздуха, ибо тогда невозможно было бы понять того изменения в знаке $\frac{k}{c}$, которое происходит при переходе от опытов Реньо к опытам нашим и Наттерера. Вывод Зильештрёма и состоит именно в том, что знак при $\frac{k}{c}$ для воздуха при малых давлениях тот же, что и при больших давлениях, наблюденных Реньо (знак— при $\frac{k}{c}$ показывает, что с возрастанием давления PV уменьшается), а потому в интересе первых знаний о сжимаемости воздуха (и других газов) весьма важно решить, правы ли мы (при малых давлениях $\frac{k}{c}$ положительно) или Зильештрём ($\frac{k}{c}$ отрицательно), а потому обратимся теперь вновь на основании высказанного, к рассмотрению опытов и выводов Зильештрёма.

§ 94

Зильештрём утверждает, что газы под давлениями, меньшими атмосферного, сжимаются так, как воздух в опытах Реньо под давлениями, бо́льшими, чем атмосферное, то-есть он признает, что при малых давлениях газы следуют формуле (N). Выведем же, на основании этого допущения, как должно относиться $\frac{E}{E_1}$ к $\frac{V+V_1}{V}$ (§ 92) и как будет изменяться $\frac{E}{E_1}$ при переме́не давлений. Этого легко достичь, в особен-

ности если предположить, подобно тому, как предполагается в § 93, что $f(P) = kP$, то-есть что отступления выражаются прямою линиею. Этого последнего предположения нельзя сделать для выражения всей сжимаемости ни для одного какого-либо газа при всевозможных изменениях давлений; но это допущение может быть вполне удовлетворительным для некоторого узкого предела изменения давлений, потому что всякую кривую в некоторой небольшой ее части всегда можно принять за прямую, и это должно сделать здесь для простоты рассуждения. Итак, мы допускаем вместе с Зильештрёмом, что сжимаемость газов при малых давлениях следует выражению

$$(N_1) \qquad PV = c - kP$$

Из этого допущения очевидно следует, что в опытах Зильештрёма будет:

$$EV : E_1(V + V_1) = c - kE : c - kE_1,$$

а потому

$$EV - EV\,\frac{k}{c}E_1 = E_1(V + V_1) - E_1(V + V_1)\,\frac{k}{c}E_1,$$

откуда

$$(N_2) \qquad \frac{E}{E_1} = \frac{V + V_1}{V} - \frac{k}{c}\,\frac{V_1}{V}\,E.$$

Эта формула есть не что иное, как простейшее выражение вывода Зильештрёма, в ней $\frac{k}{c}$ должно быть величиною положительною, а весь член, содержащий $\frac{k}{c}$, отрицательным. Она показывает, что вывод Зильештрёма прямо противоречит результатам его наблюдений. В самом деле, по этой формуле очевидно: 1) что при всяком давлении E, отношение $\frac{E}{E_1}$ будет меньше $\frac{V + V_1}{V}$, а в опыте оказалось во всех случаях $\frac{E}{E_1}$ больше, чем $\frac{V + V_1}{V}$. Это может быть только тогда, когда отступления от Мариоттова закона следуют формуле (H); а не (N), то-есть когда справедлив вывод, сделанный мною и Кирпичевым, и неверен тот вывод, который сделал Зильештрём.

2) Далее формула (N_2) показывает, что с уменьшением E отношение давлений $\frac{E}{E_1}$ будет становиться все бо́льшим и бо́льшим, потому что тогда вычитаемое будет уменьшаться, следовательно отношение $\frac{E}{E_1}$ будет увеличиваться, а так как Зильештрём нашел (а это есть его единственный довольно прочно стоящий вывод, стр. 241 [=560], что с уменьшением давления $\frac{E}{E_1}$ уменьшается, а не возрастает, то его данные, на которых он главнейшим образом опирается, говорят против применимости к разреженным газам формул (N), (N_1) и (N_2), а заставляют

предполагать применимость к ним формулы (*H*), то-есть данные эти подтверждают наш вывод, а опровергают вывод Зильештрёма.

Итак, Зильештрём сделал положительную ошибку в своем выводе, его же наблюдения утверждают то, что нашли я и Кирпичев и опровергают заключения, им сделанные. Ошибка его особенно резко видна в том, что он в одно и то же время предполагает, что $\frac{E}{E_1}$ меньше истинного значения (равного 1,472, как предполагает Зильештрём) отношения $\frac{V+V_1}{V}$ и в то же время признает, что с уменьшением E значение отношения $\frac{E}{E_1}$ уменьшается. Это ни в каком случае немыслимо, потому что по формулам (*N*) и (*H*), исчерпывающим все возможные случаи отступления от Мариоттова закона, при уменьшении давления значения отношения $\frac{E}{E_1}$ должны во всяком случае приближаться к истинному значению $\frac{V+V_1}{V_1}$. В том случае, когда отступления следуют формуле (*N*), с уменьшением давления отношение $\frac{E}{E_1}$ должно возрастать, а в том случае, когда отступления следуют формуле (*H*), с уменьшением давления отношение это должно уменьшаться. Но пределом в одном случае возрастания, а в другом уменьшения должно быть в обоих случаях отношение $\frac{V+V_1}{V}$. Итак, опыты Зильештрёма могут быть объясняемы, только допустив, согласно нашим опытам, что отступления от Мариоттова закона при малых давлениях следуют формуле (*H*). Для окончательного подтверждения этого заключения, я привожу здесь расчет изменения PV для воздуха, на основании средних из данных всех 16-ти рядов наблюдений, сделанных Зильештрёмом. В этом расчете принято во внимание и то различие температуры, которое было для частей прибора, находящихся вне ванны. Оно, правда, незначительно, но несколько влияет на результат наблюдения. Для расчисления необходимо было знать, и мемуар Зильештрёма дает на это возможность, объем воздуха, находящегося вне ванны со льдом, при каждом отчитывании давления. Называя в целом ряде наблюдений чрез E_0, E_1, $E_2 \ldots E_i$ давления, последовательно наблюденные на открытом манометре и барометре, а чрез e_0, e_1, $e_2 \ldots e_i$ давления, наблюденные в сосуде B, чрез n_0, n_1, $n_2 \ldots n_i$ число делений манометра, наполненных воздухом (сообщенным с A), при соответственном отчитывании давлений, мы имеем следующее выражение, полученное после соответственных преобразований, для расчета данных опытов.

$$P_{i+1}V_{i+1} = P_iV_i\left[\frac{10\,000E_{i+1} + 4\,677(E_{i+1} - e_i)}{E_i} + 5{,}6 + n_{i+1}0{,}44 - n_i0{,}65\right],$$

причем P_0V_0 принято равным 1000. Средний результат из всех наблюдений, приводимый в прилагаемой таблице, может быть получен

и на основании тех средних данных, которые приведены выше, на стр. 240[=559]. При расчете вероятной погрешности наблюдения полученного произведения PV, я брал сумму погрешностей, заключающихся в наблюдениях произведений P_iV_i и $P_{i+1}V_{i+1}$. Эти суммы погрешностей относились, конечно, к произведению $P_{i+1}V_{i+1}$. Такую сумму необходимо было взять потому, что для расчета некоторого $P_{i+1}V_{i+1}$ нужно было знать и числа P_iV_i, как видно по вышеприведенной формуле, а следовательно в произведении $P_{i+1}V_{i+1}$ заключается погрешность не только тех данных, которые отвечают давлению P_{i+1}, но и тех данных, которые заключаются в произведении P_iV_i. Таким образом, результат наблюдений Зильештрёма над воздухом выражается следующею таблицею.

Давления около	Средние PV из 32 данных	Вероятная погрешность
760	1 000	0,0
450	997	0,1
200	992	0,4
100	991	1,0
45	990	9,6
25	996	5,0
15	998	10,0

Значительность вероятных погрешностей, заключающихся в выводе, который можно извлечь из данных Зильештрёма, показывает, что данные эти имеют мало веса для разрешения вопроса о сжимаемости разреженных газов, в особенности для давлений ниже 45 мм.

Таким образом, правильный разбор результатов Зильештрёма показывает:

1) Что опыты его не позволяют делать никакого суждения о низких давлениях, в особенности ниже 25 мм. Поэтому все рассуждения Зильештрёма о природе газов при значительном разрежении (§§ 14, 15, 17 его мемуара) лишены всякой фактической опоры.

2) Что для давлений от 760 до 100 мм., для коих погрешность опыта наименее велика, данные Зильештрёма прямо противоречат его выводам и заставляют утверждать, что отступления от Мариоттова закона тогда совершаются по формуле (H), как это вытекает и из наблюдений, сделанных мною и Кирпичевым, хотя и нет надлежащей стройности в совокупности данных, добытых Зильештрёмом.

Так как вопрос о существовании того или другого рода отступлений от Мариоттова закона для разреженных газов имеет, как видно из всего предшествовавшего, значение для разрешения капитальных вопросов науки, а именно вопросов: о природе эфира, о границах земной атмосферы, о применимости к разреженным газам понятия о совершенных газах, лежащего в основании механической теории теплоты, о размерах атомов и т. п., то мы с М. Л. Кирпичевым решились продолжать наши наблюдения над разреженными газами, усовершенствуя при этом методы наблюдения, сравнительно с теми, которые

служили нам при наблюдениях с прибором № 4. Для этой цели я построил новый прибор; опыты с ним и составят предмет изложения одной из последующих глав. Только тогда, когда и при новых улучшениях способов наблюдения мы получим данные такие же, какие получили до сих пор, мы остановимся на рассмотрении совокупности чисел, полученных в наших наблюдениях. Смысл отступлений, то-есть существование отступлений по формуле (H) для разреженных газов для нас несомненен и в настоящее время, но численное значение $f(P)$ при малых P для разных газов подлежит для нас сомнению, потому что некоторую погрешность наши опыты с прибором № 4 имели, и нам казалось возможным устранить некоторые из поводов к погрешностям и таким образом с бо́льшею точностью определить значение $f(P)$ при разных P для различных газов.

Январь 1875 г.

Девятая глава

Предварительные опыты для определения сжимаемости воздуха при давлениях, немного превышающих атмосферное давление

§ 95

В первой главе этого сочинения приведены доводы в пользу того, что сжимаемость газов при высоких давлениях должна быть меньшею, чем следует по закону Бойль-Мариотта, как это и видно из наблюдений над пороховыми газами и над газами, не сгущающимися в жидкость при высоких давлениях (Наттерер), а также и для водорода, по опытам Реньо, для давлений от 1 до 30 атмосфер. В предшествующей главе приведены данные, показывающие, что для воздуха, водорода и угольной кислоты, при давлениях меньших атмосферного, наблюдается сжимаемость того же рода, то есть

$$PV = c + f(P), \qquad (H)$$

где f(P) есть величина положительная при малых P. Такого рода наблюдение согласно с теми сведениями о границе атмосферы, которые были рассмотрены на стр. 5[-242].

Итак, теоретические соображения и результат практических наблюдений для всех газов и самых разнообразных давлений, почти от нулевого до давлений в 5000 атмосфер (пороховые газы) показывают, что для разных и, по видимости, всех газов справедливо выражение (*H*).

Исследования же Реньо для воздуха, азота, окиси углерода и других газов, несгущающихся в жидкость, равно как и для таких газов, как сернистый газ и углекислый, сгущаемых в жидкость, показывают, что для давлений от 1 до 30 атмосфер эти газы сжимаются более, чем следует по Мариоттову закону, то-есть получаемый при высшем давлении объем меньше того, который следует получить по закону Мариотта; а потому для этих последних газов

$$PV = c - f(P). \qquad (N)$$

Не подлежит никакому сомнению, что такое выражение действительно применяется к газам, сгущающимся в жидкость, и это следует из того, что наблюдения, сделанные Депре и Эндрюсом, совершенно согласны в этом отношении с выводами Реньо. Но может рождаться сомнение по отношению к таким газам, как воздух, азот и окись углерода, которые не сжимаются в жидкость, а однако представляют тот

род отступлений от закона, который мы будем называть далее отрицательною сжимаемостью. Поэтому, для несгущаемых газов необходимо повторить наблюдения Реньо, дабы убедиться в том, какой ряд сжимаемости имеют они от 1 до 30 атм.

Сомнение в абсолютной справедливости и малости погрешности в опытах Реньо здесь возможно по многим причинам. Главнейшие причины суть:

1) Если при давлениях меньших атмосферного и при давлениях весьма высоких опыт показывает положительную (H) сжимаемость, то весьма мало вероятно, чтобы при промежуточных давлениях сжимаемость была отрицательною (N). Если же она в действительности такова, то отступления от Мариоттова закона представляют весьма большую сложность.

2) В опытах Реньо температура ртути, находящейся в манометре, должна была быть, особенно при давлениях высоких, выше, чем показывают термометры, висящие рядом с манометром, потому что температура ртути, вводимой в манометр, первоначально была выше температуры окружающего пространства; а известно, что ртуть, заключенная в стеклянный сосуд, принимает чрезвычайно медленно температуру окружающего пространства в воздухе. Лучшим тому доказательством служат те хронометры с ртутным уравнительным маятником, в которых взят стеклянный резервуар для ртути: они, как известно, не следуют за быстрыми изменениями температуры именно вследствие того, что ртуть заключена в стеклянный сосуд и медленно принимает температуру окружающего воздуха. Прямые опыты легко убеждают в справедливости этого заключения, если измерять температуру ртути при перемене температуры окружающего воздуха. Температура ртути, вводимой в манометр, у Реньо была, конечно, выше температуры наружного воздуха в большинстве его определений, ибо манометр Реньо при высоких давлениях, как известно, выдавался из здания, в котором производился опыт. Если же температура ртути была выше, чем показывали термометры, повешенные близ манометра, то при расчете давлений и приведении их к давлению, выраженному ртутью, взятою при .0°, делалась погрешность одного рода, а именно: получались давления, бо́льшие, чем были в действительности. Если допустить при 10 метрах высоты ртутного столба погрешность в температуре, равную 3-м градусам, то погрешность в давлении может достичь 5 мм.

3) В той трубке, которая служила у Реньо для определения объемов газов, наверху был примастичен кран и емкость газа, находящегося в нем, а также могущего помещаться в углублениях мастики, его закрепляющей, должна была быть упущена при определении объемов газа, потому что объемы газа определялись по количеству ртути, вмещающейся в трубку; а небольшие углубления в мастике, равно как и объем газа, в кране находящийся, не могли быть выполнены с определенностью ртутью при такого рода способе измерения объемов. Если же допустить, что объем, в действительности занятый газом в опытах Реньо, был больше того, который занимала ртуть, то и должно будет получить тот род отступлений от Мариоттова закона, какой найден

Реньо для воздуха и азота, то-есть отрицательный.[1] При таком допустимом предположении можно было бы думать, что уклонения в противную сторону, замечаемые для водорода, зависят от того обстоятельства, что истинные отступления от Мариоттова закона для этого газа столь велики, что погрешности опытов не могут их покрыть, а только их уменьшают.

В виду этих соображений, прежде, чем приступить к дальнейшим опытам над сжимаемостью газов, я считал необходимым убедиться в том, существуют ли для воздуха те значительные отрицательные отступления, которые нашел Реньо для него при давлениях, не много превышающих атмосферное давление. Действительно по опытам Реньо для давлений от 750 до 1500 мм. следует, что произведение VP на каждый метр давления уменьшается на 0,0015 первоначальной величины, а такое крупное изменение легко наблюдать, ибо тысячные доли давления при этом суть целые миллиметры. В этой главе описываются первые сделанные мною наблюдения этого рода. Они, к сожалению, должны были быть прекращены ранее надлежащего, вследствие того обстоятельства, что прибор ($n°$ 6 рис. XI), в котором производились опыты, будучи подвергнут давлению, немного более значительному, чем то, до которого он был испытан, при этом разорвался.

§ 96

Метода наблюдения, примененная мною для первых определений сжимаемости воздуха при давлениях высших атмосферного, ничем в сущности не отличается от той, которая применена для давлений

[1] Это можно вывести из следующего простого соображения: предположим, что газ следует закону Мариотта, то-есть что для него произведение из давления на объем есть величина постоянная, и пусть, при давлении, равном P_0, объем вмещающейся ртути равен V_0, а когда давление будет P_1, то объем, занимаемый ртутью, будет V_1. Объем, занимаемый газом, будет тогда очевидно больше V_0 и V_1 на некоторую постоянную величину, которую назовем чрез k, а потому имеем по закону Мариотта:

$$P_0(V_0 + k) = P_1(V_1 + k),$$

откуда $P_1V_1 = P_0(V_0 + k) - P_1k = c - kP_1$; а такою формулою и выражается сжимаемость воздуха в опытах Реньо. Приводимое здесь соображение может служить противовесом понятию о конволюмах (Дюпре § 93), показывая, что вместо какого-либо теоретического значения конволюмы могут иметь прямое практическое значение — пустот в мастике, в кои ртуть не проникает, а газ входит. Судя по данным $P_0 = 1$, $v_0 = 1950$ и $\frac{k}{c} = 0{,}0012$, приведенным в § 93 для воздуха, можно думать, что объем этих пустот, средним числом, был около 0,001 всего объема газа. Этот последний занимал наибольший объем, равный 1950 гр. ртути, следовательно, объем пустоты был около 1,95 гр. ртути или около 0,14 куб. сант., что допустить возможно. Замечу при этом, что все важнейшие наблюдения Реньо, помещенные в 1-м томе его отчета, по точному его выражению, сделаны были в одном и том же приборе, что сам Реньо видел возможность погрешности в объемах. Главное различие тех методов наблюдения, которые применяются мною, от Реньо состоят именно в том, что у меня в объемах нельзя подозревать погрешностей такой величины, как в давлениях, а потому погрешность опыта сводится почти исключительно на погрешность в определении давлений.

меньших атмосферного и описана в предшествующей главе, по поводу прибора *n*° 4. Взят был даже тот самый сосуд, который служил в приборе *n*° 4, описанном в предшествующей главе. Манометр, служивший в этом случае для измерения давлений, был открытый, как наиболее легко изготовляемый; а потому давление определялось чрез сложение давления атмосферного с давлением, наблюдаемым в открытом манометре. На рис. XI-2 видно общее расположение частей в этом приборе. *A* есть ванна, в ней находится яйцевидный сосуд, в котором производилось сжатие воздуха, об объеме которого можно было судить по весу ртути, выливающейся из крана *R* чрез трубку *H*.[1] Ртуть вводилась в яйцевидный сосуд, манометр *MN*, сгуститель *L* и ртутный запор *E* из высоко помещенной воронки *Q*. Каучуковая трубка (оплетенная, см. стр. 80[=344]) *R*, идущая от нее, кончается краном r_6, проводящим ртуть, смотря по желанию в соответственный сосуд. Так ртуть *Q* проводится в яйцевидный сосуд при открытии зажима r_4; тогда ртуть поступала сперва в *F* и чрез R_1 входила в трубку *GH* и яйцевидный сосуд. Если же зажим r_4 был заперт, а открывался зажим r_3, то ртуть поступала в ртутный запор *E* и запирала при этом газ в капиллярной трубке *D*. Когда ртуть в запоре поднималась на некоторую определенную высоту до метки, тогда кран R_4 запирался и таким образом не было затем нужды следить за изменением уровня ртути, происходящим в запоре, что значительно облегчило наблюдение за ходом явления и устранило возможность случайного перебрасывания ртути из запора в яйцевидный сосуд или в манометр. Если зажим r_3 был также заперт, а зажим r_2 отперт, то ртуть поступала в сосуд *L*, предварительно наполненный воздухом, и выгесняла его оттуда, сдавливая до желаемой меры. Сдавленный газ из сгустителя *L* чрез краны R_5 и R_3 мог поступать в сосуд *E*, окружающий запор, а следовательно и в яйцевидный сосуд *A*, когда запор не был заперт. При открытии зажима r_1 ртуть из резервуара *Q* могла поступать в манометр *MN* и занимать в нем надлежащий уровень, определяющий давление газа в яйцевидном сосуде. Рядом с манометром помещалась далее описываемая трубчатая мера SS_2. Она состоит из железной трубы, могущей вращаться на острее и с поясами a_1, a_2,...a_5. Расстояние между этими поясами предварительно особою компарациею с нормальным манометром было определено при некоторой постоянной температуре и, следовательно, было известно в опыте. В среднем из 8 определений, часть которых была сделана М. Л. Кирпичевым, а другая мною, при переводе к 20° оказалось расстояние реперных линий, нанесенных на серебряных поясах этой трубки следующее: начиная с одного (в опыте с прибором *n*° 6 этот конец штанги был обращен кверху) конца:

---

[1] Трубке этой придана вверху форма буквы *Z*, вследствие того, что двукратно сосуд, при наполнении ртутью и при возвышении давления, сломался в этом месте. Это зависело от того, что дно ванны *A* несколько подавалось вниз и трубка *H* не представляла достаточной гибкости, чтобы выдержать те малые перемещения, которые при этом происходили. Когда трубке этой была придана форма буквы *Z*, эти перемещения могли совершаться с легкостью и безопасно для сосуда.

Расстояние	1-ой	черты	от	2-ой	1000,668 до 1000,685,	среднее	1000,67	мм.
„	2	„		3	1000,670 до 1000,685	„	1000,68	„
„	3	„		4	1000,469 до 1000,490	„	1000,47	„
„	4	„		5	400,788 до 400,796	„	400,79	„
„	5	„		6	99,976 до 99,991	„	99,98	„

Давления газа в яйцевидном сосуде видоизменялись (чрез выпускание ртути из крана R) так, чтобы столбы ртути в манометр умещались как раз почти от черты a_1 до соответственных верхних черт a_2, a_3, a_4 и т. д. Небольшие разницы между положением вершины менисков ртути манометра и положением реперных линий железной трубки определялись катетометрами, помещенными на соответственных высотах. В тех опытах, которые далее приводятся, первоначальное наивысшее давление газа в яйцевидном сосуде было равно приблизительно атмосферному давлению + высота ртутного столба в 1400 мм. (то-есть столб ртути был между 5 и 3 реперными линиями железной трубки). Когда был наблюден объем при этом давлении, ртуть из яйцевидного сосуда выпускалась до тех пор, пока не получалось давление, равное атмосферному давлению + 400 мм. или около того, потому что ближайшая черта a_2 от той черты a_1, к которой всегда пригонялся уровень ртути в манометрической ветви, отстояла на 400,79 мм. при 20°. Температура ртути в манометре определялась несколькими термометрами, рядом с манометром помещенными в сосудах такой же толщины и диаметра, как и манометрическая трубка, имевшая в диаметре около 20 мм. Термометр T_3, поставленный около манометрической ветви M, был помещен в сосуд, наполненный воздухом, и показывал температуру той части газа, которая находилась вне ванны. Главная же масса газа имела температуру. показываемую термометром T_4.

Сушило J давало возможность входящему в сгуститель L газу подвергаться полному предварительному высушиванию. Когда весь газ сосуда L был переведен, чрез вливание ртути в яйцевидный сосуд, [1] тогда кран R_3 запирается, а краны R_2 и R_5 открываются, равно как и зажим r_5, и тогда в сосуде L давление газа будет равно атмосферному, и ртуть будет выливаться чрез зажим r_5, а на место нее будет входить сухой газ. В последних опытах, произведенных с описываемым прибором $n°$ 6, сгущение газа производилось, однако, не при помощи сгустителя L, а при помощи особого добавочного прибора, изображенного на рис. XI—I. Кран этого прибора e, при помощи каучуковой трубки, оплетенной толстою пеньковою ниткою, соединялся герметически с трубкою K, идущею к сушилу прибора, а в сосуд предварительно накачивался газ под определенным давлением. Когда затем кран e в добавочном приборе, а также краны R_2, R_3 и R_4 в приборе $n°$ 6 были открыты, тогда газ поступал из добавочного сосуда в сгущенном состоянии в яйцевидный сосуд. В этом доба-

[1] На рис. сделана ошибка по отношению к трубке, идущей от крана R_3 к сосуду E: она доведена только до трубки, соединяющей кран R_2 с краном R_3, а в действительности она доходит до сосуда E, окружающего запор, и проводит газ из сгустителя L, чрез E и D в яйцевидный сосуд.

вочном сосуде сгущение газа производилось нагнетательным насосом, и сосуд, изображенный на рис. XI—I, может быть рассматриваем, как газометр для сгущенного газа. Этот сосуд образован из латунной трубки диаметром в 70 мм., с толщиною стенок около 5 мм. Такого рода трубки употребляются для паровых котлов на больших пароходах, а потому непосредственно могут быть получаемы в продаже. Употребленные мною трубки идут с завода Чикина, где они предварительно и испытываются уже до давлений около 10 атмосфер. Но прямой опыт показал мне, что они выдерживают давления гораздо бо́льшие, даже достигающие до 30 атмосфер. Чтобы превратить такого рода трубки в газометры для сжатого газа, я приделал по обоим концам металлические части, видные на дне в разрезе. *ab* представляет кольцеобразное углубление, в которое вставляется край трубки *cc*, служащей газометром. Наружная стенка днища имеет три винта *dd*, которыми можно нажать на стенку трубки *c* и тем определить положение днища по отношению к трубке. Герметичность же соединения достигается при этом при помощи мастики, потому что кольцеобразное углубление *ab* предварительно наполняется расплавленною мастикою, когда днище разогрето, и тогда трубка *cc*, конец которой также разогрет, вставляется в расплавленную мастику, причем винты *dd* завинчиваются. Внутренняя часть днища выточена в виде отрезка шара, дабы получить острые края *a*, которые по возможности точно притачиваются к внутреннему диаметру трубки *cc*. При увеличении давления газа внутри сосуда, острый край *a* нажимает на трубку *e* еще больше, чем первоначально, подобно тому, как это употребляется в известном кольце Бродвеля в нарезных пушках. Переносность всего сосуда, в котором после накачивания кран запирается и сгущенный газ может быть долгое время сохраняем, делает его чрезвычайно удобным для всех работ со сгущенными газами, и после многих проб такого рода газометр для сгущенного газа я считаю наиболее практичным во всех отношениях. Весьма важно при этом упомянуть и обратить надлежащее внимание на то обстоятельство, которое до сих пор ускользало от внимания практиков, а именно, что при помощи каучуковых трубок есть возможность переводить с большою легкостью весьма сильно сжатые газы из одного сосуда в другой, например из нагнетательного насоса в газометр, подобный вышеописанному. Каучуковую трубку легко и скоро можно присоединять как к насосу, так и к подобному газометру, если при том и другом находятся соответственные трубки, наружный диаметр которых подходит к внутреннему диаметру каучуковой трубки. Привязка каучуковой трубки тогда только будет достаточно прочна, если концы тех трубок, к которым она привязывается, имеют углубления и выдающиеся места, подобно тому, как представлено на рис. XII—1, при кране *e*. Тогда привязывающая нитка достаточно прижимает в углубленных местах каучук к трубке и не позволяет ему при увеличенном давлении соскользать с трубки. Обыкновенные каучуковые трубки раздуваются и лопаются даже от давления, немногим превышающего 2—3 метра, даже и в том случае, когда диаметр отверстия трубки не превышает толщины ее стенок. Возможность при помощи

каучуковых трубок переводить газы, под высоким давлением находящиеся, достигается только тогда, когда трубки оплетены правильным образом плотною пеньковою ниткою. Из практики моей в этом отношении оказывается, что такие трубки выдерживают давления, достигающие 150 атмосфер, совершенно безопасно, если только привязка их, или соединение с другими приборами сделано с надлежащею герметичностью и точностью, что представляет не малые затруднения, если давления, которым подвергаются трубки, весьма велики. Практический вопрос о возможности проведения сжатых газов при помощи каучуковых трубок в особенности важен в том отношении, что каучуковая трубка со сжатым газом представляет чрезвычайную гибкость и подвижность, что и дает возможность пользоваться сжатым газом в том случае точно так, как пользуются в лабораториях на каждом шагу обыкновенным газом, проводимым каучуковыми трубками, или как пользуются струею воды. Если применять сжатый газ как двигатель для домашнего употребления, что вероятно со временем и будет достигнуто, то распределение сжатого газа оплетенными каучуковыми трубками сделает такого рода применение чрезвычайно практичным во всех отношениях, потому что дозволит удобно распоряжаться сжатым газом.

§ 97

Что касается до постоянных величин, которые были необходимы для прибора $n°$ 6, то определение их было произведено теми же способами, как и для прибора $n°$ 4, что описано в предшествующей главе. Упомянем здесь только о способе определения объема газа, вне ванны находящегося, то-есть между метками: в капиллярной трубке ртутного запора D, в манометрической ветви при черте a_1, и в капиллярной трубке, восходящей от яйцевидного сосуда при некотором определенном делении. Объем этот найден был несколько раз, и здесь приводится одно такое наблюдение для того, чтобы показать способ расчета, при этом применяемый. Первоначально ртуть была введена в яйцевидный сосуд до метки и оставлена в нем, чтобы приняла температуру ванны. В пространстве, над нею находящемся, был сгущен при помощи сгустителя газ так, чтобы его давление было выражаемо атмосферным давлением + высота столба от a_1 до a_3. При этом положение ртути в манометрической ветви регулировалось чрез прибавку ртути таким образом, чтобы ртуть занимала приблизительно положение, отвечающее метке a_1. Когда это было достигнуто, ртуть в яйцевидный сосуд была поднята так, чтобы вершина ее занимала также положение близ метки, а именно она стояла при 15,0-м делении и когда положение ее оказалось неизменным в течение 20′ (ртуть в запоре была поднята заранее до метки и кран R_4 заперт), тогда сделаны были следующие определения: барометрическое давление (по непосредственному наблюдению равно было 774,15—18,51 мм. при 17°,00, по термометру $n°$ 36, коего поправка = = —0°,17), отчет положения ртути в открытой и в закрытой ветвях манометра и определены температуры ванны и манометры. Оказывается, что атмосферное давление, действующее на верхний конец манометра,

равно 753,86.[1] При расчете наблюдений с прибором $n°$ 6 все давления выражены высотами столбов ртути при 0°; такая поправка сделана и в отношении к вышеприведенному числу. Для суждения о том давлении, которое действует в манометре, катетометром наблюдалось положение нижнего мениска по отношению к черте a_1 таким образом, что неподвижная нить трубы катетометра устанавливалась на вершину мениска и затем подвижные нити той же трубы устанавливались на черту a_1. Таким образом в этом наблюдении положение мениска отвечает по микрометру 953-му делению, а положение черты a_1 1018-му делению. Так как одно деление микрометра при том расстоянии, которое здесь было, равняется 0,0180 мм., то из предшествующих данных оказывается, что черта была выше мениска (мениск = 953, черта = 1018 деление микрометра) или вершина мениска была ниже черты на 65 делений микрометра или на 1,17 мм. Этот результат наблюдения выражается в журнале числами в столбце «нижний мениск» 953, и в столбце нижняя черта a_1 = 1018. Точно так же определялось и положение верхней части ртути по отношению к соответствующей черте железной трубки a_3, положение верхнего мениска. Температура манометра, выведенная из показаний двух термометров, равняется 17°,15 без поправки, которая для этих термометров равна — 0,36°. По наблюденным данным высота ртути в манометре = 1042,96 мм. при 0°. Температура ванны при этом отчете была, также без поправки, равна 16,692°. Поправка для этого термометра ванны по отношению к норме равна — 0,501. Положение ртути в капиллярной трубке, которою кончается яйцевидный сосуд, равнялось 15 делениям. Из предшествующих данных, а также из того, что расстояние черт, которым отвечали высоты ртути в манометре, равнялось 1401,26 мм. при 20°, следует, что давление, которое представлял наблюденный столб ртути, было равно 1402, 96 мм. при 0°. Очевидно, что объем, занятый газом, при этом определении был равен искомому объему между метками, который назовем чрез x, плюс объем, занятый газом, начиная от метки a_1, а именно на расстоянии 1,17 мм. этот объем равняется 3,98, судя по тому, что предварительное калибрование манометрической трубки показало в этом месте, что 1 мм. высоты трубки вмещает 3,60 граммов ртути. От этого объема должно отнять объем, занятый ртутью в капиллярной трубке. Так как одно деление капиллярной трубки, которою снабжен яйцевидный сосуд, как показали предварительные опыты, вмещает 0,02 гр. ртути, то 15 делений вмещают 0,3 гр. ртути. Надо упомянуть о том, в дальнейших наблюдениях объем определялся по весу ртути, вылившейся из прибора, и что в этом весе заключались и эти 0,30 гр. ртути. Результат всего наблюдения (сделанного 3-го ноября 1874 г.) был следующий:

[1] Барометр (B, рис. IX-2), примененный при приборе $n°$ 6, находился на таком уровне, что ртуть в открытой его ветви была в одной плоскости со ртутью в закрытой ветви манометра прибора; а потому давление, действующее на открытую ветвь манометра, равно давлению, наблюденному на барометре, минус то изменение давления, которое отвечает поднятию на высоту ртути в манометре наблюденному, а именно приблизительно на каждый метр поднятия на 0,09 мм.

	Барометрическое давление при 0° на вершине открытой ветви манометра	Манометрическое давление, приведенное к 0°	Исправленные на разновес веса взятой ртути	Объемы, занятые газом, в граммах ртути по исправлении на температуру ртути и воздуха и на сжимаемость сосуда
	B_0	M_0	Q	V
I	753,86	1402,96	—	$x + 3{,}83$
II	753,88	408,54	64,85	$x + 64{,}22$
III	753,76	+ 8,56	70,70	$x + 133{,}22$

Из этих данных можно определить x, пользуясь законом Мариотта, который здесь можно приложить, потому что все отступление не превышает (при изменении давления на 1,5 метра) 0,002, а объем x достаточно было определить с этою степенью точности.

Для определения послужат три уравнения, в коих для взятой массы газа принято $pv = C$.

$$\begin{aligned} \text{I}\quad & 2156{,}8\ (x + 3{,}83) = C \\ \text{II}\quad & 1162{,}4\ (x + 64{,}22) = C \\ \text{III}\quad & 762{,}41\ (x + 133{,}22) = C \end{aligned}$$

Решая комбинации I и II, I и III, II и III уравнений, находим среднее $x = 66{,}99$. Опыты, сделанные ранее того, дали число 67,13 и 66,82, а потому при дальнейших расчетах x принято = 67,0 гр. ртути. Бо́льшей степени точности в наблюдениях этого рода нельзя было и ждать, да и не было нужды гнаться за бо́льшею точностью, по той причине, что при определении объемов газа дециграмм ртути выражал столь малые доли газового объема, что наблюдения, до них относящиеся, входили в погрешность опыта.

§ 98

В течение ноября (6-го декабря прибор разорвался) 1874 г. я сделал многие опыты с прибором $n°$ 6 и преимущественно при давлениях, близких к 2150 мм., 1160 и 760 мм., ибо высоты ртути в манометрических ветвях тогда отвечали реперным чертам a_1, a_2 и a_3. Привожу для примера результаты двух параллельных опытов, тем только отличающихся друг от друга, что в первом объем воздуха был в $3^1/_2$ раза менее, чем во втором.[1]

[1] Такое различие было взято нарочно для того, чтобы получить суждение о существовании или отсутствии сгущения газа на поверхности стенки. Если оно есть, то при большой массе газа влияние его будет менее заметно, чем при меньшей, и вычитая pv, полученные для малой массы из тех, которые получаются для большой массы, можно было устранить главную часть влияния сгущения. В результате такого рода сличений оказывается, что в пределах погрешностей опыта, при тех все-таки больших массах газа и малых поверхностях сгущения, какие были у меня, сгущение на поверхности не оказывает заметного влияния на результат опытов над сжимаемостью газов.

	B_0	M_0	P	V	PV		T [1]
10 ноября	759,03	1397,96	2156,99	4252,16	91 719	10 000	170,59
	759,18	399,28	1158,46	7924,47	91 802	10 009	
	759,19	+ 2,57	761,76	12048,97	91 784	10 007	
13 ноября	762,13	1404,71	2166,84	14474,97	31 365	10 000	17°,41
	762,36	396,45	1158,81	27072,19	31 372	10 002	
	762,44	+ 6,62	769,06	40804,78	31 381	10 005	

Наблюдения, сделанные с прибором $n°$ 6, все такого рода, что подтверждают в общих чертах справедливость вывода Реньо, показывая, что с увеличением давления произведение PV уменьшается. Вышеприведенные данные двух полных наблюдений, сделанных при давлениях, равных с теми, при которых определялась емкость сосуда между метками вне ванны, показывают степень точности этих предварительных наблюдений. Замечу при этом, что в результате этих наблюдений введены были все те поправки, как и в результаты наблюдений, описанных в предшествующей главе: на изменение емкости сосуда от перемены давлений, на температуру воздуха вне и внутри ванны, на изменение емкости сосуда от выливания ртути, на погрешность гирь, употреблявшихся для взвешивания, на упругость воздуха, заключающегося в барометрической пустоте, на разность давления при разной манометрической высоте, сверх поправки на температуру ртути в манометре и барометре. То, что в прилагаемой таблице названо B_0, есть барометрическое давление, действующее на открытый конец манометра, M_0 есть манометрическое давление, выраженное столбом ртути при температуре 0°, P есть все давление, под которым находится газ, то-есть сумма давлений барометрического и манометрического, бывших в опытах.

Приняв в двух предшествующих опытах, равно как и в других подобных же приведенному опытах, произведение PV при P, равном 2160 мм., за 10000, получим, что произведение P_1V_1, при P_1, равном 1160 мм., равно в первом опыте 10009, а во втором опыте 10002. При давлении $P = 760$ мм., то же самое произведение P_2V_2 в первом опыте равняется 10007, а во втором 10005. Числа эти и другие, сходные с ними, показывают, что отступления от Мариоттова закона для воздуха, при давлениях, немного превышающих атмосферное, гораздо меньше тех, какие дает Реньо, потому что данные его, помещенные в первом томе «Relation etc.» показывают, что произведение PV на каждый метр давления изменяется на 15 десятитысячных; следовательно, приняв давление при 2160 за 10000, должно было бы по Реньо ждать при 1160 мм. для произведения PV значения 10015, а оно вышло в одном опыте 10009, а в другом 10002. Для давления же в 760 мм. нужно было бы, по

[1] В опытах с прибором $n°$ 6 температура ванны, указанная (по исправлении) под T, не приводилась к 17°,5, как при опытах с прибором $n°$ 4, но воздух вне ванны и температура в отдельных наблюдениях известного ряда приводилась по расчету или на опыте к T.

Реньо, ждать произведения PV равным 10021, а оно вышло равным в одном опыте 10007, а в другом опыте 10005. Следовательно, *отступления, найденные мною в предварительных опытах, гораздо меньше тех, которые нашел Реньо,* хотя смысл или качество отступлений в моих опытах оказались в этом случае такими же, как и у Реньо.

§ 99

Таким образом с количественной стороны опыт показал значительные (до 8 десятитысячных) различия: 1) в отдельных наблюдениях друг от друга и 2) различия в выводе из опытов Реньо и из моих определений. Обсуждая такой результат, я пришел к тому мнению, что в моих опытах причиною погрешности служит определение температуры ртути, находящейся в открытом манометре. Непосредственно погрузив шарик термометра в ртуть манометра и сравнивая его показания с показаниями термометра, висящего рядом с манометром, я заметил невероятно большие различия, достигающие до целого градуса в том случае, когда давление уменьшалось и ртуть из манометра должна была быть выливаема, и когда чрез то она опускалась на высоту более метра. Находясь вверху, при первоначальном (высшем) давлении, ртуть принимает высшую температуру верхних слоев комнатного воздуха. При выпуске ртути, вследствие уменьшения давления, вытекают, конечно, нижние, более холодные слои ртути, и преимущественно вытекают они из открытой ветви манометра, ибо в ней и происходит перемена положения ртути. В закрытой ветви манометра уровень ртути во все время опыта остается на одном и том же месте, потому теплые части ртути, спустившись сверху вниз, не успевают охладиться до температуры, показываемой термометром, близ того места находящимся. При этом получается погрешность, зависящая прежде всего от того, что при определении начального давления P_0 температура ртути определяется почти верно,[1] а при определении следующих меньших давлений P_1 и P_2 мы читаем на термометре, висящем вне манометра, температуру меньшую, чем та, которую имеет ртуть манометра. Вследствие этого, приводя к 0° высоту ртутного столба, мы берем меньшего делителя (равного $1 + kt$, где k есть коэффициент расширения ртути, а t температура ее), чем должно, и, следовательно, получаем бо́льшее давление, чем следует. Так как в действительности произведение PV получалось при уменьшенном давлении, большее, чем при высшем давлении, то должно думать, что при определении истинного давления (при правильной поправке на температуру ртути) с уменьшением давления, PV будет увеличиваться *еще меньше,* чем вышло у меня. Итак, причина различия отдельных опытов состоит, вероятно, в том, что температура ртути наблюдалась неверно по термометрам, находящимся вне ртути. Вторую причину неправильности показаний давления составляет при наблю-

[1] Ибо долго остается в своем положении. Обыкновенно еще накануне я приводил ее в надлежащее положение, наполнив таким, как должно, количеством газа яйцевидный сосуд.

дении меньших давлений то обстоятельство, что часть манометра, ниже метки a_1, будет в тех же условиях, в каких и вся выше находящаяся часть ртути, а именно (при уменьшенном давлении после выливания ртути из манометра) более теплая ртуть будет находиться в нижней части открытой ветви манометра. Мы считаем, что те части манометра, которые находятся ниже черты a_1, уравновешивают друг друга, имея одинаковую температуру; но, судя по вышесказанному, эти части не будут иметь одинаковую температуру. Одна, обращенная к прибору, закрытая часть манометра будет все время неподвижна или почти неподвижна и потому принимает температуру окружающего пространства, будет иметь ту низшую температуру, которую показывает близстоящий термометр. Другая же часть, обращенная в воздух, будет заключать ртуть более теплую. Очевидно, что для уравновешивания более холодной ртути закрытой ветви манометра потребен в открытой более теплой ветви ртутный столб большей высоты, а потому в действительности истинное манометрическое давление будет еще меньше того, которое непосредственно читается чрез определение расстояния от вершин менисков в открытой и закрытой ветвях манометра.

Таким образом несомненно, что в приведенных выше предварительных моих опытах была причина, увеличивающая при малых давлениях произведение PV. По этой причине, при устройстве дальнейших приборов для определения сжимаемости, а именно в приборе $n°$ 8, весь столб ртути в манометре (и барометре) я погрузил в водяную ванну. Важнее же всего обратить внимание на то обстоятельство, что при существовании несомненной причины погрешностей, увеличивающих при малых давлениях PV в моих опытах, они дали все-таки не такое быстрое увеличение, какое наблюдал Реньо, а потому предварительные опыты, произведенные в приборе $n°$ 6, я считаю несомненно указывающими на необходимость повторения опытов Реньо над газами при давлениях выше атмосферного, со всеми необходимыми в настоящее время предосторожностями. Такие же неточности в определении температур, как и в моих предварительных опытах, были, несомненно, и у Реньо. В них, должно думать, заключались кроме того (§ 95) погрешности в определении объемов, а потому, пока не получено более точных чисел, должно заключить, по отношению к сжимаемости воздуха при давлениях немногим высших, чем атмосферное (от 1 до 3-х атмосфер), что:

1) Отрицательная (по формуле N § 95) сжимаемость воздуха должна быть меньше той, какую дает Реньо.

2) Меньшая, чем у Реньо, полученная мною, отрицательная сжимаемость воздуха должна еще более уменьшиться, если будут приняты предосторожности для правильного определения температур ртути в манометре.

3) Так как в определениях Реньо есть, кроме этого, и другие (§ 95) поводы к увеличению отрицательной сжимаемости и так как при давлениях менее атмосферного воздух представляет (глава VIII) положительную (по формуле H) сжимаемость, какую несомненно (глава I)

имеют все газы подобно жидким и твердым телам и при очень высоких давлениях, то необходимо новыми точнейшими опытами подтвердить существование отрицательной сжимаемости.

Дальнейшие мои исследования получили, по причине этих выводов, новое направление и значительно усложнились. Первоначально, приступая к работе, можно было думать, что числа Реньо послужат исходными для всей работы с газами при высоких давлениях, ныне я вижу, что все их неизбежно необходимо воспроизвести вновь, что составляет ныне ближайшую цель, к которой направлены мои усилия.

Декабрь 1874 года.

ОБ УПРУГОСТИ ГАЗОВ

ОГЛАВЛЕНИЕ ПЕРВОЙ ЧАСТИ

Стр.

Письмо к председателю И. Р. Технического Общества, Петру Аркадиевичу Кочубею 223

Глава I. О задачах учения об упругости газов и способах их разрешения опытным путем 235

§ 1. Отступления от закона Мариотта по опытам Реньо. § 2. Понятие о совершенном газе и потребность новых опытов, особенно для разреженных газов. § 3. Опыты Ерстеда над сжатыми газами и Румфорда над пороховыми газами. § 4. Опыты Наттерера и Каильте показывают то же, что дали пороховые газы. § 5. При значительных давлениях все газы должны сжиматься менее, чем следует по закону Мариотта. § 6. Выражение для отступлений от этого закона. Опыты Эндриуса. § 7. Что особенно важно изучить в отношении к упругости газов. §§ 8 и 9. Основные начала тех приемов исследования, которые должно считать наиболее точными. § 10. Проект барометра, способы поправок. § 11. Проект сложного манометра для давлений в 80 атмосфер. § 12. Определение при помощи того же прибора больших давлений. § 13. Средства для сжимания газов. § 14. Сосуды для взвешивания сжатых газов. § 15. Проект устройства весов и способа взвешивания. § 16 и 17. Размеры коромысла весов. Для увеличения чувствительности весов должно уменьшать до известного предела длину коромысла. § 18. Определение объемов. § 19. Об единицах мер.

Глава II. О степени точности в определении зависимости между объемом и упругостию газов 287

§ 20. Общее уравнение для газов $KAP = \frac{M}{V}(C + T)$. [1] Значение K. Эту величину должно считать переменною V и ею выра-

[1] Вот простейший способ вывода этого уравнения. Если при объеме = 1 масса газа = k, то при объеме = V она будет M = kV. Если при давлении = 1 масса газа = k_1, то по закону Мариотта, при давлении P она будет = k_1P. Если при весе частицы = 1 масса газа = k_2, то по закону Авогадро-Жерара, при частичном весе A, масса газа будет = k_2A. Если при абсолютной температуре = 1 масса газа = k_3, то при абсолютной температуре C + T, она будет, по закону Гей-Люссака, равна $\frac{k_3}{C+T}$. Поэтому, если единовременно будут изменяемы V, A, P и C + T, то масса газа будет $M = \frac{kk_1k_2k_3}{C+T} VAP$, а потому приняв $kk_1k_2k_3 = K$, получаем $\frac{M}{V}(C + T) = KAP$, где K есть величина для всех газов постоянная, если верны вышеупомянутые законы. Величина K есть масса или вес 1 объема газа, имеющего частичный вес = 1, при давлении = 1 и при абсолютной температуре = 1.

жать отступления от законов, известных для газов. §§ 21 и 22. Определение возможной погрешности в Y в зависимости от погрешностей, возможных в P, M, V и T. § 23. Расчет погрешностей, возможных по весовому и, § 24, по объемному способам. § 25. Выводы из предшествующего. § 26. Выводы из опытов Реньо данных для расширения ртути: $Vt = 1 + 0{,}0001797\ t + 0{,}0000000223\ t^2$.[1] § 27. Выражение, принятое для расширения воды. Новый способ определения коэффициента расширения сосудов. § 28. О весе литра воздуха по данным Реньо. Зависимость от напряжения тяжести. Стр.

Глава III. О некоторых практических приемах при исследовании упругости газов 326

§ 29. О мастике для герметического и прочного соединения частей приборов. § 30. Способы скрепления мастикою. § 31. Водяные насосы и ртутный насос Гейсслера. § 32. Насос Шпренгеля и улучшение его. § 33. Сифонный ртутный насос без кранов и клапанов. § 34. Каучуковые трубки, выдерживающие большие давления. Зажимы. Устройство и испытание кранов. § 35. Винтовые запоры или краны. § 36. Ртутный запор. § 37. Очищение внутренних стенок сосудов. § 38. Сушение газов. § 39. Очищение ртути.

Глава IV. О ртутных барометрах и манометрах для слабых давлений 359

§ 40. Наполнение барометрических трубок ртутью кипячением. § 41. Воздух не растворяется в ртути. Первый холодный способ наполнения ртутью. § 42. Холодный способ наполнения ртутью барометров, снабженных капиллярною трубкою. § 43. Правило, предложенное мною для отчета и принятое Вильдом. § 44. Наблюдение высот и поправки ее. § 45. Определение упругости газов в торичеллиевой пустоте. Применение для этой цели второго барометра и резервуара с воздухом постоянной температуры. § 46. Нахождение барометрической поправки по закону Мариотта и по второму приближению. § 47. Устройство сложного барометра. Выводы при наблюдении упругостей и при нахождении поправки. Результат одного из определений. § 48. Второе приближение в примере их наблюдений сложного барометра. § 49. Пример для обыкновенного случая. § 50. Выводы из изучения барометров. Приготовление коротких манометров.

Глава V. О дифференциальных барометрах 402

§ 51. Определение разности давления. Основные начала устройства прибора. § 52. О нефтяном масле. Его получения и свойства. § 53. Основное уравнение и его упрощение в виде: $x = kD + k_1 t + k_2 n$. § 54. Способы нахождения коэффициентов k, k_1 и k_2 при помощи самого прибора. § 55. Простейшие, первоначальные формы прибора, назначенного для постоянного места наблюдения. § 56. Прибор с постоянною температурою, с резервуаром в земле. Простота получаемого результата. Применение для метеорологических наблюдений. § 57. Применение дифференциального барометра для нивеллирования. § 58. Основное уравнение. Способы определения плотности воздуха. Определение тем же прибором. § 59. Условия для простейшего способа приближенного нивелли-

[1] После того как была напечатана глава 2-я, я вновь перечислил все данные Реньо для расширения ртути и пришел к формуле, сходной с приведенною выше, о чем см. Журн. Русск. Химического и Физического Общества за 1875 г. Вероятнейшая формула, полученная мною ныне из опытов Реньо, введя некоторые новые поправки, есть $Vt = 1 + 0{,}0001801\ t + 0{,}00000002\ t^2 \pm 0{,}000005$.

рования прибором. § 60. Способы различной степени точности. § 61. Погрешность, возможная в барометрическом определении высот. Роль дифференциального барометра состоит в скором определении подробностей в изгибе местности. § 62. Переносные формы дифференциального барометра. [1]

Стр.

Глава VI. Об изучении стеклянных трубок 444

§ 63. Определение диаметров трубок и их сечений. Поправка на объем мениска при калибровании широких трубок. Пример. § 64. Приемы для калибрования капиллярных трубок. § 65. Гипотеза, положенная в основание моих приемов калибрования, состоит в допущении на длине трех коротких капель изменения сечений по кривой второго порядка. § 66. Основные начала калибрации при этой гипотезе. § 67. Способ расчета данных, полученных с малою каплею. § 68. Нахождение поправки для первого приближенного сечения. § 69. Деление трубки на части равной емкости. § 70. Возможно-краткий пример калибрации. § 71. Калибрование трубок по волосности. § 72. Выбор трубок с параллельными стенками. § 73. Определение давления, разрывающего трубки. Способ и результаты наблюдения. Трубки с толщиною стенок около $1^1/_2$—2 мм. суть самые прочные. § 74. Натяжение, существующее в материале трубок. Доказательства.

Глава VII. О катетометрах и о способах их применения для определения давлений 490

§ 75. Устройство примененных катетометров. § 76. Окулярный микрометр. Его изучение и примеры. § 77. Уровни. Устройство отчета. Определение чувствительности. § 78. Ввод поправки по отчету уровня. § 79. Невозможность в обычном катетометрическом отчете устранения некоторых погрешностей заставляет в точнейших наблюдениях прибегать к способу компарации. Приемы этого способа. Отчетная труба, устроенная для наблюдений. § 80. Малый катетометр, в коем устранены важнейшие недостатки обычного устройства. Отсутствие в нем окулярной выдвижки. § 81. Установка катетометров. Способ наблюдения вершин ртути и другие практические приемы наблюдения.

Глава VIII. Первые наблюдения над упругостию разреженных газов 518

§ 82. Отсутствие точных сведений об упругости разреженных газов заставило меня прежде всего заняться ими. § 83. Основные начала тех приемов, которые применены для этой цели; форма прибора. § 84. Объем газа определяется из веса вытекшей ртути, из малого объема вне ванны и из поправок на температуру и сжимаемость сосуда. § 85. Расчет сжимаемости сосуда. Совпадение опытов Реньо и Корню. Практическое определение дало сжимаемость на сантиметр давления = 0,062—0,067 гр. ртути. § 86. Сжимаемость сосуда, происходящая от выливания ртути. § 87. Описание прибора n° 4. Приемы наблюдения. § 88. Численные

[1] В последнее время я достиг дальнейшего весьма существенного, по моему мнению, улучшения и упрощения в устройстве переносных дифференциальных барометров, снабдив их металлическим, наполненным нефтью, дифференциальным термометром, имеющим легко достижимую большую чувствительность. Первое сообщение об этом предмете сделано мною в мартовском 1875 г. заседании Физического общества. Закрывая кран термометра в то же время как и барометра, мы будем наблюдать на первом изменение температуры ванны, а по второму изменение упругости воздуха. Первые наблюдения прямо дают поправку для вторых. При этом легко придать термометру большую чувствительность и прочность.

Стр.

данные для этого прибора. § 89. Пример и численные результаты некоторых наблюдений моих и Кирпичева над воздухом, водородом и углекислым газом. § 90. Результат всех наблюдений состоит в том, что pv с уменьшением p уменьшается и особенно значительно при малых p для воздуха. Этот род *положительных* уклонений от закона Мариотта иной, чем Реньо получил для воздуха, коего уклонения, при p от 1 до 30 атмосфер, суть *отрицательные*. Положительные уклонения не могут объясняться такими поводами погрешностей (сгущение на поверхности, растворение во ртути, негерметичность и т. п.), которые могут объяснять отрицательные отступления. Значительность отступлений, найденных для воздуха, показывает, что неизбежные погрешности давлений и объема не могут их объяснить. § 91. Расчет возможной погрешности. Поводы, заставившие устроить прибор n° 5. § 92. Результаты Зильештрёма, полученные для разреженных газов. Недостатки метода. Два опытных вывода. Из них Зильештрём сделал неправильные заключения. § 93. Три возможные случая для произведений давления на объем. Положительные и отрицательные уклонения. Свод наблюдений Реньо для воздуха. По гипотезе о несжимаемости материи атомов, отступления должны быть положительными. § 94. Необходимые следствия из опытов Зильештрёма говорят только в пользу положительных отступлений, какие открыты нашими наблюдениями.

Глава IX. Предварительные опыты для определения сжимаемости воздуха при давлениях в 1—3 атмосферы 571

§ 95. Необходимость повторения определений Реньо для сжимаемости воздуха. Поводы к сомнениям в точности определения объемов и давлений. § 96. Способ, примененный в моих наблюдениях. Описание прибора. § 97. Постоянные величины этого прибора. § 98. Пример численных данных. § 99. Вывод из этих наблюдений: таких больших отрицательных отступлений, какие дает Реньо для воздуха, нет, а те малые отрицательные уклонения, какие найдены мною, должны будут еще уменьшаться, когда устранятся поводы к неточностям в определении температур, как то и достигается во вновь устроенном приборе.

Оглавление первой части 584

Описание XII-ти таблиц, приложенных к этой части 588

ОБ УПРУГОСТИ ГАЗОВ

Д. Менделеева

ОПИСАНИЕ РИСУНКОВ, ПРИЛОЖЕННЫХ К 1-ой ЧАСТИ

Рис. I—1, 2, 3 и 4. Способ, примененный для уравнения температуры метров и других шкал при компарации. Описание будет помещено во 2-й части отчета.
Рис. I—5 и 6. Прием для калибрования метра. См. 2-ую часть отчета.
Рис. I—7. Устройство уровня для удобства наблюдения его показаний при катетометрах.
Рис. II—1, 2, 4, 5, 10, 11, 13 и 14. Способы соединения различных частей приборов мастикою. § 30.
Рис. II—3, 6, 7, 8, 9 и 12. Малый катетометр, в общем виде, в плане и в подробностях. § 75—79.
Рис. III—1. Первичная форма постоянного дифференциального барометра. § 55.
Рис. III—2. Устройство крана § 34.
Рис. III—3 и 4. Большой переносный дифференциальный барометр. § 62.
Рис. IV—1 и 2. Отчетная трубка для точных наблюдений. § 79.
Рис. IV—3. Способ наполнения манометров ртутью. § 50.
Рис. IV—4 и 5. Барометр. § 40, 43, 44 и 45.
Рис. IV—6, 7 и 8. Прием для определения сопротивления стеклянных трубок разрыву. § 73.
Рис. V—1. План расположения приборов при изучении сжимаемости газов при малых давлениях (см. рис. VI и VII—1). § 84.
Рис. V—2. Разрез яйцевидного сосуда и ванны с мешалкою в том же приборе (см. I A, рис. VI и VII—1). § 83—84.
Рис. V—3. Устройство зажима для каучуковых трубок. § 34.
Рис. V—4, 5, 6 и 7. Устройство малого, переносного дифференциального барометра с постоянным уровнем нефти. § 62.
Рис. VI—1. Прибор (n° 4) для определения сжимаемости газов при давлениях, меньших, чем атмосферное. См. рис. V—1 и VII—1. Описание см. глава VIII § 84.
Рис. VI—2. Часть бароманометра для изменения количества ртути. § 85.
Рис. VI—3. Стальная насадка манометров с иглою. § 81.
Рис. VI—4. Схема ртутного запора. § 36.
Рис. VII—1. Схема прибора для малых давлений (см. рис. V—1 и VI—1). § 83.
Рис. VII—2. Барометр с сифонною капиллярною трубкою. § 42 и 43.
Рис. VII—3. Сифонный ртутный насос. § 33.
Рис. VII—4. Холодный способ наполнения барометров ртутью. § 41.
Рис. VIII—1, 5 и 6. Большой катетометр и его подробности. § 75, 76.
Рис. VIII—2. Способ наблюдения катетометром. § 78.
Рис. VIII—3. Схематическое изображение того, что видно в трубу катетометра, когда наблюдают высоты ртутных столбов. § 76 и 81.
Рис. VIII—4. Схематическое изображение перемещения, возможного в трубе катетометра без перемены показаний уровня. § 79.
Рис. VIII—7 и 8. Постоянный дифференциальный барометр с постоянным уровнем нефти. § 55.
Рис. IX—1. Комбинация водяного и ртутного насосов, дающая совершеннейшую пустоту. § 32.
Рис. IX—2. Схема винтового запора. § 35.
Рис. IX—3. Стальной ртутный сгуститель. Проект. § 13.
Описание будет помещено во 2-й части отчета.

Рис. IX—4. Стальной сосуд для взвешивания сжатых газов. Проект. § 14. Описание во 2 томе.
Рис. X—1. Постоянный дифференциальный барометр с резервуаром в земле. § 56.
Рис. X—4. Переносный дифференциальный барометр простейшего устройства. § 62.
Рис. X—3. Свеча, окруженная водяным резервуаром для удержания лучей тепла при освещении. § 81.
Рис. X—4. Водородный термометр с бароманометром. Будет описан в последующих частях отчета.
Рис. XI—1. Газометр для сжатых газов. § 96.
Рис. XI—2. Общий вид прибора (n° 6), примененного для определений сжимаемости при давлениях, немного превышающих атмосферное. См. главу IX. § 96.
Рис. XII—1. Способ установки стеклянных метров. Будет описан в следующих частях отчета.
Рис. XII—2. Прибор для изучения коэффициентов расширения газов при постоянном давлении. Будет описан в следующих частях отчета.

Конец I части

Энциклопедический Лексикон Березина. С. Петербург, 1875 г. Отд. оттиск. Тип. тов. „Общественная польза". Стр. 1—22.

О ВОЗДУХЕ

Воздух (атмосферный воздух). Поверхность земного шара отовсюду окружена газообразной оболочкой, составляющей атмосферный воздух. Толщина этой воздушной оболочки, сравнительно с диаметром земли, весьма не велика, если справедливы те измерения атмосферной высоты, которые, со времен арабского ученого Альгацена, делают на основании того наблюдения, что заря прекращается, когда солнце спустится под горизонт на 18°. При этом предполагают, что последние лучи зари доходят чрез отражение от верхнего слоя атмосферы (см. рефракция). Судя по этим сведениям, высота атмосферы не более 70 верст, что составляет около $\frac{1}{100}$ земного радиуса (= 6366 верстам). При таком расчете предполагается, что земная атмосфера ограничена сверху слоем, из которого частицы воздуха не выделяются в свободное небесное пространство. Предположение об ограниченности земной атмосферы заставляет думать, что на ней наступает граница упругости воздуха, или равновесие между притяжением к земле с одной стороны и центробежною силою и упругостью с другой. Ограниченность атмосферы, однако, и поныне не имеет фактических доказательств, хотя есть много поводов допустить ее. По противоположному мнению должно допустить, что воздушная оболочка земли не имеет границы, а постепенно переходит в то вещество, которое наполняет вселенную и носит название светового эфира (потому что служит для передачи световых колебаний). Световой эфир несомненно есть вещество, потому что иначе он не мог бы обладать упругостью, при помощи которой передаются световые волны. Изменение, замеченное Энке в скорости движения кометы, носящей его имя, служило долгое время доказательством материальности светового эфира; но в последнее время Астен доказал, что такого замедления в действительности нет, а потому утратилось и последнее доказательство весомости светового эфира, а следовательно, и безграничности атмосферы. Если бы частицы атмосферного воздуха распространялись повсюду в небесном пространстве, хотя и в разреженном состоянии, они должны были бы сгущаться около других небесных светил, и эти последние должны были бы обладать атмосферою такого же свойства, как и земная, а между тем, путем спектрального исследования, то-есть изучением световых лучей, достигающих от небесных светил, несомненно доказывается, что атмосфера многих небесных тел значительно отличается от земной. В прежнее время полагали, что луна не имеет атмосферы, но наблюдения Гершеля над покрытием звезд луною, показали присутствие атмосферы на луне в долинах ее гор;

на вершинах же ее гор атмосфера разрежена, подобно тому как и земная атмосфера в своих верхних слоях, а потому существование лунной атмосферы не замечается при покрытии звезд наружным краем луны. До сих пор, однако, нет никаких сведений о составе лунной атмосферы, а потому вопрос о границе земной атмосферы должно считать еще нерешенным с положительностью.

Вес всех слоев земной атмосферы определяется барометром (см. барометр), показывающим, что все слои воздуха, лежащие над поверхностью данного места, имеют вес, равный весу того столба ртути, который поднимается в барометре. Так как средняя высота ртути в барометре приблизительно равна 760 миллиметрам, то вес всей земной атмосферы равен весу слоя ртути этой высоты, одевающей всю земную поверхность. А так как кубический сантиметр ртути весит 13,596 граммов, то столб ртути, высотою в 760 мм., имеющий в сечении один квадратный сантиметр, весит 1033 грамма, следовательно, на каждый квадратный километр (около кв. версты) земной поверхности приходится вес воздуха, близкий к 10 миллионам тонн (каждая тонна = 1000 кило или около 60 пуд.). Вес всей земной атмосферы около 5150000 миллиардов тонн (около 5 триллионов килограмм). «Если бы мы могли вместить всю земную атмосферу в шар и привесить его на коромысло весов (помещенных в пустом пространстве), то для уравновешивания этого шара нужно было бы положить на другую чашку весов 581000 кубов меди, имеющих в размере 1 километр» (Дюма и Буссенго). Эта громадная масса воздуха распределена на земной поверхности весьма неодинаково, не только в разных слоях воздуха, но и на разных частях земной поверхности. Среднее годовое барометрическое давление на уровне океана не всюду одинаково; у экватора оно меньше, чем при больших широтах; наибольшее барометрическое давление соответствует приблизительно 30° широты, как в северном, так и в южном полушарии. От этих широт к высшим, т. е. к полюсам, среднее годовое барометрическое давление опять уменьшается. Если оно будет измерено на уровне океана, то близ экватора оно равняется около 760 миллиметрам, близ 30° северной и южной широты 766° мм., а близ 60° широты 755 мм. Такое распределение атмосферного давления указывает как будто-бы на то, что наибольшие массы воздуха скопляются около 30° широты, и, следовательно, распределение массы атмосферной оболочки земли не соответствует распределению массы твердой и жидкой ее оболочек, ибо эти последние представляют форму шара, сплющенного с полюсов, так что у экватора диаметр земли имеет наибольший размер. Вследствие существования центробежной силы, должно было бы думать, что удобоподвижная воздушная оболочка земли, вращающаяся с нею, примет в высшей мере эту сплющенную форму, принадлежащую самой земной поверхности и тогда бы давление на экватор было наибольшее. Так как на экваторе барометрическая высота оказывается меньше, чем у 30° широты, то можно думать, что барометрическое давление не показывает веса атмосферы. В самом деле, движущаяся масса воздуха, как и движущаяся струя жидкости, представляет, так называемое, гидродинамическое давление, зависящее не только от высоты и плотности

жидкости, но и от скорости движения струи жидкости. При отпертом кране водопровода давление близ точек выхода струи воды будет гораздо меньше, чем при запертом кране. Между тропиками несомненно существуют восходящие токи воздуха, происходящие от нагревания, уменьшающие барометрическое давление, и постоянные пассатные ветры, действующие подобным же образом. Сверх того, частицы воздуха, над тропиками находящиеся, описывают в данное время наибольшие круги вместе с земною поверхностью, следовательно, и подчиняются преимущественному действию центробежной силы, то-есть вес их наиболее уменьшается. Должно думать, что восходящие между тропиками струи воздуха, уменьшая барометрическое давление, распределяются в высшие широты в верхних слоях атмосферы, и что от этой причины барометрическое давление на экваторе ниже, чем на высших широтах.

Воздух, как и всякое газообразное тело, обладает свойством жидкостей передавать давление во все стороны и сжиматься под давлением выше лежащих слоев. Вследствие этого, он плотнее на земной поверхности, чем в слоях, от нее удаленных. Допуская границу земной атмосферы, надо допустить границу разрежения воздуха, и на этой границе должно допустить давление равным 0, потому что поверх не будет уже атмосферы. От той плотности, какую имеет воздух на поверхности земли, до той, какую он имеет в области предельного давления, плотность воздуха изменяется последовательно. Закон этого изменения зависит от физических свойств, принадлежащих воздуху, и от его состава, потому что от них изменяются температура и упругость воздуха, определяющие вес его кубической меры. Мы возвратимся далее к определению этого закона изменения плотности в разных высотах атмосферы, а первоначально познакомимся с составом и физическими свойствами воздуха.

Воздух есть смешение многих и весьма разнообразных веществ: в нем находятся газы, жидкие и твердые тела. Между газами два входят в наибольшем количестве; это суть азот и кислород. В 100 весовых частях воздуха около 23 весовых частей кислорода и около 77 весовых частей азота; в 100 объемах воздуха около 79,1 азота и около 20,9 кислорода. Газы, составляющие главную массу воздуха, открыты в нем в восьмидесятых годах прошлого столетия французским ученым Лавуазье, на основании того различия, которое представляют свойства названных составных частей воздуха. Азот не принимает участия ни в дыхании животных, ни в горении веществ, ни в тлении или гниении остатков растительных и животных, ни в ржавлении металлов; эти процессы совершаются только на счет кислорода воздуха, который вступает в химическое соединение с веществами в указанных процессах. Нагревая ртуть в ограниченном и определенном объеме воздуха, Лавуазье поглотил при помощи ее весь кислород воздуха; из ртути образовалась, так называемая, красная окись ртути, или ржавчина ртути, а вместо воздуха остался азот — газ, ни дыхания, ни горения не поддерживающий; кислород воздуха химически соединился со ртутью. На основании указанного различия в свойствах азота и кисло-

рода есть возможность, путем химического анализа определить с точностью количество этих газов во взятой массе воздуха. Такое определение показывает, что отношение между количеством кислорода и азота в воздухе во всех обычных случаях (на различных высотах, в различных странах, в разные времена года и дня) почти всегда одно и то же, а именно равно вышеприведенной пропорции. Кислород, находящийся в воздухе, составляет $^8/_9$ по весу воды, около половины веса каменистых и землистых веществ и, следовательно, составляет наибольшую часть тел животных и растений, ибо в них содержится не менее 70% воды, а потому кислород есть преобладающая составная часть всей массы земли. Когда земля образовывалась, кислород, бывший в огромном количестве, взошел в твердую и жидкую ее оболочки, в атмосфере же осталась только малая доля этого простого тела. Азота в массе твердых и жидких составных частей земли почти нет; горные породы и вода содержат только весьма малые количества его соединений, но живые организмы растений и животных заключают в себе азотистые соединения. Таким образом, азот составляет вещество, находящееся почти исключительно на поверхности земли. Это зависит от того, что к металлам, кислороду и водороду, составляющим главную массу земли, азот имеет малое химическое сродство, т. е. с ними прямо не соединяется, в отличие от кислорода, который с большинством веществ легко и во многих обстоятельствах образует химические соединения, твердые и жидкие. Таким образом, роль азота в земной атмосфере иная, чем кислорода. В тех химических превращениях, которые на поверхности земли совершаются, азот принимает малое участие, тогда как кислород — большое. Далее мы рассмотрим роль каждого из этих газов в отдельности, а теперь перейдем к перечислению остальных составных частей воздуха.

За азотом, составляющим главную массу воздуха, и кислородом, следующим за ним в этом отношении, должно поставить водяной пар, находящийся всегда и во всяком воздухе, но в различной пропорции, смотря по температуре воздуха и по условиям, среди которых он находится. Всякому известно, что вода испаряется в воздухе, ибо влажные предметы сохнут. Количество водяного пара, могущего содержаться в данном объеме воздуха, не зависит ни от его давления, ни от содержания в нем других веществ, а зависит только от его температуры. В кубическом метре воздуха, при указанной температуре, может содержаться в граммах не более, как ниже приводимое количество водяного пара:

при	— 30°,	по	стоградусному	термометру,	$\frac{1}{2}$ грамма
„	— 10°,	„	„	„	2 „
„	— 0°,	„	„	„	5 „
„	+ 15°,	„	„	„	13 „
„	+ 30°,	„	„	„	30 „

Если к воздуху, таким образом насыщенному водяным паром, прибавить еще сухого воздуха, то водяной пар распространится совершенно

равномерно во всей массе воздуха, но воздух будет относительно суше. Если воздух, насыщенный водяным паром, будет затем охлажден, то при этом не может оставаться в том же объеме воздуха прежнее количество пара, и часть его превращается в жидкое или твердое состояние, отчего и образуется роса, — при ночном охлаждении и при внесении холодного сосуда или предмета в пространство, содержащее влажный воздух, например, при внесении зимою охлажденного предмета в комнату. От этой же причины воздух выделяет из себя в верхних слоях атмосферы, где температура гораздо ниже, часть воды в виде облаков, разрешающихся дождем, снегом или градом. Таким образом, в воздухе содержится в разных обстоятельствах весьма различное количество водяного пара, ибо воздух может быть и насыщен и не насыщен водяным паром и имеет в разных условиях различную температуру, а потому и в насыщенном состоянии различное содержание водяного пара. На земной поверхности, где атмосферное давление близко к 760 миллиметрам, кубический метр воздуха весит от 1,3 до 1,2 килограмма, смотря по тому, какова температура его, а именно — если она изменяется от —10° до +30°. При таком различии температур, в кубическом метре воздуха будет заключаться, по сказанному выше, от 2 до 30 граммов водяного пара, т. е. пропорция водяного пара в процентах по весу будет изменяться от $^1/_6$ до $2^1/_2\%$. Вследствие того, что воздух охлаждается, из водяного пара происходит твердая и жидкая вода, то-есть туман, роса, облака, дождь и снег. Так как туман и облака не дают радуги, то они не содержат капель воды, а жидкая вода содержится в них в форме тонкостенных, мелких пузырьков, подобных мыльным. Несомненно ныне, что облака состоят из мелких пузырьков жидкой воды или из мелких кристаллов снега, как показал Галлей и что прямо (лупою) наблюдал в Альпах Соссюр. Судя по измерению колец, образующихся около луны и солнца, Кемц определил размеры облачных пузырьков. Диаметр их изменяется от 0,02 (летом) до 0,04 (зимою) тысячных долей миллиметра. Меняется также толщина оболочки, при ее утолщении пузырьки лопаются, образуются сливающиеся вместе капли, и это может составлять причину дождя.

Водяные пузырьки и мелкие кристаллы снега, скопляясь в облака, туманы и т. п. осадки, висят в воздухе вследствие той же самой причины, вследствие которой муть висит в воде, хотя более ее тяжела, ибо скорость падения тел в жидкости зависит от отношения между поверхностью и массою, в ней заключенною: в совершенно спокойной атмосфере, как в спокойной воде, легкие тела падают медленно, струею движущейся жидкости уносятся далеко. Легкий пузырек воды, содержащий внутри воздух, мало отличается от него по своей плотности и потому падает чрезвычайно медленно; малейшего усилия достаточно для его поддержания или парения. Дальнейшее рассмотрение атмосферных осадков, их образования чрез испарение воды на земной поверхности и превращения их в дождь и снег составляет предмет соответственных других частей этого лексикона, а именно статей: вода, дождь, метеорология, снег, облака и др.

Четвертую по количеству и не менее важную по значению в природе газообразную составную часть воздуха образует углекислый газ, тот самый, который происходит при горении угля и содержит углерод и кислород. В воздухе всегда находится углекислый газ, и это понятно, потому что в природе есть множество условий для его образования: животные при своем дыхании поглощают кислород и выдыхают углекислый газ; остатки их, равно как и растительные остатки, сгнивая или сгорая, образуют с кислородом воздуха также углекислый газ. Он, однако, не скопляется в воздухе и не увеличивается в своей массе, потому что растения поглощают углекислый газ и уменьшают его количество в воздухе. Без поглощения углекислого газа растения не увеличиваются в своей массе. Он, значит, точно так же необходим для них, как для животных кислород. Однако, его количество в воздухе ничтожно мало относительно кислорода. Легко узнать присутствие углекислого газа в воздухе, если пропустить его чрез воду, настоенную на извести и содержащую ее в растворе, потому что углекислый газ с известью, находящеюся в растворе, дает белую муть или осадок углеизвестковой соли, образующей мел, известняк, мрамор и т. п. Другие щелочные вещества, подобно извести, поглощают углекислый газ; а потому, если некоторую массу воздуха пропустить чрез взвешенную трубку, содержащую щелочь, углекислый газ останется в этой трубке, и по прибыли в ее весе можно судить об относительном содержании углекислого газа в воздухе. Подобным образом, пропуская воздух чрез вещества, могущие поглощать воду, например, чрез хлористый кальций или серную кислоту, можно определить весовое содержание в воздухе воды. Для определения углекислого газа в воздухе имеются и многие другие способы, еще более простые. В особенности удобен тот способ Петенкофера, который применяется для исследования содержания углекислого газа в жилых помещениях и который состоит в поглощении углекислого газа баритовою водою, подобно тому как в предшествующем опыте углекислый газ поглощается известковою водою. Содержание углекислого газа в 10 000 объемах свободного воздуха изменяется от 2 до 5 объемов; а так как углекислый газ почти в $1^1/_2$ раза тяжелее воздуха, то в 10 000 частях по весу воздуха содержится от 3 до 6 весовых частей углекислого газа. Обыкновенное содержание его в воздухе не превышает 4 объемов в 10 000 объемах воздуха. Нельзя при этом не обратить внимания на то, что при весьма малом относительном содержании углекислого газа он играет весьма важную роль в воздухе, судя уже по одному тому, что на счет его питаются растения. Те остальные составные части воздуха, о которых речь будет далее, встречаются в воздухе еще в меньшей пропорции, но это не уменьшает их значения; в природе, для определения роли данного вещества, так сказать, маловажно количество, а гораздо важнее качество. Азот в наибольшем количестве находится в воздухе и играет в нем наименее существенную роль.

Между газами в воздухе в малом количестве найдены многие другие. Аммиак всегда находится в воздухе; его пропорция, однако, весьма значительно меняется. Происходя при изменении многих рас-

тительных и животных веществ, например, выделяясь из навоза, аммиак и должен находиться в атмосфере, как всякие вещества, выделяющиеся в газообразном или парообразном состоянии при изменениях, на земле совершающихся, ибо основное свойство газов и паров состоит в том, что при взаимном прикосновении они друг друга вполне проникают, так что в результате получается под конец совершенно однородное смешение. Где бы и какой бы то ни было газ, сколько бы ни выделялся, он весь распределится в атмосфере, и это свойство газов именуется диффузией. Аммиак есть газ, состоящий из водорода и азота. Выше было указано, что растения и животные содержат азот, но газообразного азота воздух не поглощает. Азот входит в состав тела животных только при помощи растительной пищи и вследствие содержания в растениях сложных азотистых соединений. Масса тела животных состоит из азотистых веществ, которых в растениях мало, но которые в них всегда находятся. Питательны только те живые (листья), или назначенные для сохранения жизни (как например, семена, шишки, как у картофеля и т. п.), части растений, которые содержат непременно азотистые вещества. Без поглощения растительных азотистых веществ животные питаться не могут и умирают, ибо сами азотистых веществ образовать в своем теле не могут, а тратят его при жизненных процессах, извергая постоянно в виде мочи, волос, пота и других выделений. В растениях же азотистые вещества образуются не на счет азота воздуха, а на счет соединений азота, поглощаемых из почвы; в почве же азотистые вещества содержатся только по стольку, по скольку они введены в виде навоза или в виде остатков растений и животных, или вследствие того, что они поступают в нее из воздуха, например, при помощи дождевой воды. Дождевая вода растворяет аммиак и другие азотистые вещества, как то: азотную кислоту и азотисто-аммиачную соль, находящиеся в малом количестве в воздухе, а потому и эти, почти в едва измеримом количестве находящиеся в воздухе, составные его начала имеют определенную и весьма важную роль в круговороте процессов, на земле совершающихся. Содержание в воздухе названных азотистых веществ, столь необходимых для питания растений, обязано не только тому, что эти вещества образуются чрез изменение животных и растений, но также и тому, что они вновь в воздухе могут образоваться при помощи азота, в нем находящегося. Если бы этого не было, то запас органической материи, а следовательно, и количество живых существ на земной поверхности постепенно бы уменьшались вследствие того, что часть имеющихся на земной поверхности азотистых веществ разрушается, например, при горении, образуя газообразный азот. Механизм образования азотистых веществ в воздухе состоит в том прежде всего, что кислород способен соединяться с азотом в воздухе в присутствии водяного пара при действии ряда электрических искр, образуя азотную кислоту. Хотя этот химический процесс и не дает ее больших количеств, но он постоянно в природе совершается и вознаграждает некоторую убыль в количестве сложных азотистых веществ, причем происходящая азотная кислота растворяется в дождевой воде и поступает в почву для питания растений. Когда есть азотная кислота,

может уже образоваться и аммиак, и азотисто-аммиачная соль, потому что они могут происходить из азотной кислоты чрез действие металлов, водорода и других так называемых восстановляющих веществ, способных отнимать часть кислорода от азотной кислоты и прибавлять к ней водород. Азотистая кислота, азотисто-аммиачная соль и аммиак могут получаться таким образом из азотной кислоты, но они могут образоваться и независимо от нее и помимо других азотистых веществ — непосредственно из азота воздуха, в особенности в то время, когда кислород его служит для окисления других веществ. Дело здесь в том, что азотисто-аммиачная соль представляет состав такой, что может происходить из азота и воды, и она (сухая, со взрывом) при нагревании распадается на воду и азот. Следовательно, там, где имеются эти вещества, как это и есть в воздухе, может образоваться азотисто-аммиачная соль, а следовательно, и азотистая кислота, и аммиак. Образование азотисто-аммиачной соли из азота и воды замечено до сих пор с несомненностью в тех случаях, когда воздух, содержащий азот, воду и кислород, служит для некоторых случаев окисления. Так, например, если медь окисляется в присутствии аммиака и влажного воздуха, она дает азотисто-аммиачную соль, даже в пламени, если его охлаждать быстрою струею воздуха, можно открыть присутствие азотисто-аммиачной соли, потому что и в нем совершается процесс окисления, то есть поглощение кислорода. Утверждают даже (Шёнбейн), что во время испарения воды часть ее дает с азотом воздуха азотисто-аммиачную соль.

Кислород воздуха под влиянием электрических искр и в особенности при так называемом тихом электрическом разряде (когда искр нет, а в темноте все-таки виден свет) изменяет свои свойства, превращаясь в озон или пахучий кислород. Такое же превращение с кислородом совершается и тогда, когда он служит для окисления многих веществ, например фосфора. Озон в $1^1/_2$ раза плотнее кислорода и весьма непостоянен; достаточно слабого нагревания, чтобы превратить его в обыкновенный кислород. Будучи уплотнен, кислород в состоянии озона способен гораздо деятельнее, чем в обыкновенном своем виде соединяться со многими веществами, то-есть служить для окисления, сожигания тел и т. п. процессов, на счет кислорода в природе совершающихся. Сам он развивается при окислительном действии кислорода и эту способность кислорода представляет наиболее развитою. В воздухе он образуется из кислорода под влиянием электрических разрядов, в воздухе происходящих, и процессов окислительных, на счет кислорода совершающихся; оттого всегда в воздухе содержится озон. Присутствие его узнается в воздухе на основании того, что бумага, пропитанная раствором иодистого калия и крахмала, не изменяющаяся от присутствия кислорода, синеет от присутствия озона. Находясь в воздухе, озон в то же время быстро в нем исчезает, служа для окисления тех веществ, которые способны окисляться на счет кислорода. Вследствие такого непостоянства, количество озона в воздухе весьма значительно меняется, и, как следует ожидать, в большем количестве озон встречается в совершенно чистом воздухе, тогда как

в воздухе городов и в особенности в воздухе жилищ, где наиболее веществ, способных окисляться, и наименее условий для образования озона, количество его будет меньше. Существует причинная связь между существованием озона в воздухе и степенью его чистоты, то-есть степенью содержания в нем посторонних, от организмов происходящих остатков, способных окисляться. Где таких остатков много, озона должно быть мало, потому что в прикосновении с этими остатками он окисляет их и сам исчезает. Там, где он есть, количество этих органических остатков, местную подмесь воздуха составляющих, несомненно мало, иначе бы они разрушили озон. По этой то причине озон и стремятся применять для очищения воздуха, развивая его искусственно в атмосфере, например, производя разряд электричества в тех каналах, которые приводят воздух в жилое помещение. Озонированный воздух, входя при этом в жилище, будет служить для разрушения, окисления, то-есть для сожигания органических остатков, в воздухе находящихся, то-есть будет служить для очищения воздуха. Такова роль озона и в природе. По этой же причине озон, развивающийся или выделяющийся (ибо он растворяется в эфирных маслах) из пахучих эфирных масел, составляет вероятную причину общеизвестного действия душистых веществ; они не только маскируют другие пахучие вещества, но и содействуют их изменению при помощи озона. Кук в Индии заметил связь между количеством озона, в воздухе находящегося, и развитием эпидемий, что стремились подтвердить и многие другие наблюдатели, но число собранных фактов в этом отношении еще недостаточно для твердого заключения.

Рядом с озоном в воздухе находится также ничтожно малое и изменчивое количество сходного по действию с ним вещества, носящего название перекиси водорода, или окисленной воды. Вещество это, развивающееся при действии кислот на перекись бария, происходит также при многих процессах окисления, когда при этом находится вода, например, в то время, когда кислород воздуха действует на амальгаму олова или цинка, смешанную с водою. Московский профессор Шёне с несомненностью доказал постоянное присутствие перекиси водорода в воздухе, всего только с год тому назад, и вопрос этот по сих пор еще мало разработан, подобно тому, как и вопрос о содержании углеводородистых веществ в воздухе. Так как из болот выделяется так называемый болотный газ, составленный из углерода и водорода, и так как каменный уголь, в недрах земли заключающийся, продолжая свой процесс изменения, подобный тому, который происходит с растениями в болотах, продолжает и поныне выделять болотный газ (от него-то с воздухом происходят взрывы в каменноугольных копях), то вследствие упомянутой выше диффузии газов болотный газ должен находиться в воздухе, и он открыт в нем Буссенго, Верве и др. Надо думать, однако, что под влиянием озона, кислорода и ряда электрических разрядов, болотный газ, находящийся в воздухе, превращается мало-помалу чрез сгорание в углекислый газ и воду, а потому его количество ничтожно мало в обычном воздухе. В воздухе болотных стран в самом деле нашли несколько большее количество болотного

газа. Таким же непостоянством и малым содержанием в воздухе отличается и водород, в нем долженствующий находиться вследствие того, что при многих процессах, на земле совершающихся, водородный газ образуется. Он найден также в продуктах извержения огнедышащих гор. Полагают, но на это нет опытных доказательств, что на крайних пределах земной атмосферы, докуда еще не достигали наблюдатели, содержание водорода увеличивается. Такое мнение основывается на том, что газы, обладающие различною плотностью, должны не вполне равномерно располагаться в смешении с атмосферой такою, как земная: легчайшие газы, по мере повышения, должны в своей пропорции увеличиваться, ибо каждый газ составляет как бы свою атмосферу, и изменение плотности этой каждой составной атмосферы в разных слоях воздуха будет зависеть от относительной плотности газов. По этой причине водород, более легкий, чем кислород, в высоких слоях атмосферы должен преобладать над ним. Точный вывод этого следствия из законов диффузии, открытых Дальтоном, был сделан в начале этого столетия, и это заключение отч сти подтвердилось впоследствии при исследовании состава воздуха на разных высотах в земной атмосфере. Буссенго нашел в Америке на высоких горах небольшую прибыль в относительном количестве азота. Вельч собрал при своем воздушном путешествии воздух высоких слоев, и по анализам воздух этот содержит немного более азота, чем на поверхности земли. Различие, однако, ничтожно мало, что и можно ждать вследствие малого различия плотностей кислорода и азота и вследствие существования передвижений воздуха. Если вышеприведенное следствие из закона Дальтона справедливо и если в воздухе содержится водород, то он должен преобладать в верхних слоях атмосферы, потому что в 16 раз легче кислорода и в 14 раз легче азота. При этом заметим, что в атмосфере многих небесных светил несомненно доказано присутствие водорода, а также и то обстоятельство, что падающие камни или аэролиты, состоящие из железа, оказались, по исследованиям Грэма, содержащими водород, а следовательно, вероятно, образовались в атмосфере водородной.

Выше было упомянуто, да и всякому известно, что в воздухе находится жидкая и твердая вода, но кроме нее и веществ, в ней растворимых из воздуха, в атмосфере содержатся и другие твердые вещества, не говоря о пыли, всегда в воздухе находящейся и при некоторых благоприятных условиях составляющей довольно значительную его массу, ибо известны случаи перенесения пыли на большие расстояния, например, из Сахары в Европу, что доказано микроскопическим исследованием пыли, садящейся из атмосферы. Кроме такой, так сказать, заметной, легко оседающей, тяжелой пыли, в воздухе носятся и составляют его неизбежную, всегдашнюю составную часть легкие твердые частицы, отчасти органического происхождения, отчасти солеобразного. Присутствие солей в воздухе нельзя объяснять их летучестью, потому что упругость их пара ничтожно мала при обыкновенной температуре, а содержание их в воздухе несомненно. Если в совершенно чистом воздухе поместить мокрую полотняную поверхность, на которую постоянно прибавлять совершенно чистой воды, и собирать об-

разующиеся капли, то в этой воде оказывается присутствие различных солей, поступивших в воду, очевидно, из воздуха. Есть доказательство иного рода: так, воздух, приходящий для питания неяркого пламени (например, пламени водородного газа или пламени, образующегося в горелках, употребляемых в химических лабораториях), оказывается с содержанием солей натрия, что становится очевидным, при рассматривании этого пламени спектральным прибором (см. эт.), по спектральной черте натрия, всегда замечаемой в этом условии. Раствор глауберовой или серно-натровой соли, насыщенный при кипении и охлажденный без доступа воздуха, не кристаллизуется; если привести его в прикосновение с воздухом, процеженным чрез вату, кристаллизации также не происходит; если же бросить в этот раствор малейшую частицу глауберовой соли, тотчас происходит кристаллизация. Если привести такой же раствор в прикосновение с воздухом, не процеженным чрез вату, то кристаллизация также совершается. Это показывает, что в воздухе находятся кристаллики глауберовой соли. Поступив точно так же с раствором уксуснокалиевой соли, не получают кристаллизации ее пересыщенного раствора, значит, не всякая соль находится в воздухе, а только некоторые.

Твердые составные части воздуха могут быть уединены из него чрез процеживание его чрез вату. Такая вата, служившая для процеживания воздуха, производит те же самые явления, как воздух, снабженный твердыми частицами, а воздух, прошедший чрез вату, не может производить многих процессов таких, которые в обыкновенном воздухе совершаются. К числу таковых процессов принадлежит один, играющий в природе и технике огромную роль, а именно процесс брожения. Сахар в слабом растворе, а также сахаристые соки растений, например, виноградных ягод, или сахаристые растворы крахмалистых веществ, получающиеся из них чрез действие дрожжей (см. это слово и брожение), под влиянием воздуха подвергаются изменению, известному под названием брожения и состоящему в том, что сахар изменяется, образуя спиртовую жидкость и углекислый газ, выделяющийся из жидкости. Так происходит винное брожение. Есть различные другие виды брожения, например, уксусное, масляное и т. п. Воздух, процеженный чрез вату, брожения не возбуждает, если жидкость, способная к брожению, предварительно была прокипячена, чрез что в ней разрушатся вещества, способные производить брожение и всюду находящиеся. Если же с прокипяченной сахаристой жидкостью, содержащею азотистые вещества, придет в прикосновение обыкновенный воздух, брожение совершается. Значит, не от действия газообразных составных частей, а под влиянием тех веществ, твердых, которые находятся в воздухе, происходит начало брожения. Эти вещества, ватою удерживаемые из воздуха, суть зародыши организмов, способных производить брожение и при брожении развивающиеся в то вещество, которое общеизвестно под именем дрожжей. Значит, в воздухе находятся зародыши дрожжевых организмов; подобным же образом в воздухе содержатся и зародыши других низших растительных и животных организмов, принимающих участие во многих процессах тления, гни-

ения и брожения, совершающихся и начинающихся под влиянием воздуха. Эти организмы уединены и эти процессы изучены преимущественно французским ученым Пастёром. Для уединения их он употребил вату, измененную от действия азотной и серной кислот в нитроклетчатку, или так называемый коллодий, растворимый в смеси спирта и эфира. Если чрез коллодионную вату пропустить совершенно чистый воздух и потом растворить коллодий в смеси спирта и эфира, то получается остаток, под микроскопом оказывающийся содержащим зародыши организмов и способный к произведению начала брожения, чем несомненно доказывается присутствие в чистом воздухе указанных остатков растений и животных. Они появляются в воздухе, потому что во время процессов брожения, гниения и тления, совершающихся на поверхности земли, организмы, например, грибы, инфузории и т. п., достигают до зрелости и развития зародышей, часть которых выбрасывается, уносится, распространяется в воздухе и висит в нем, подобно тому, как висят в нем другие весьма мелкие и легкие вещества, например облака.

Здесь необходимо также упомянуть о содержании в воздухе в некоторых условиях, хотя и не всегда так называемых миазмов, то-есть веществ, производящих некоторые роды заразительных болезней. Что это за вещества, — зародыши ли организмов, развивающихся при эпидемических болезнях в теле, или это вещества в известном состоянии изменения, способные возбуждать подобные же изменения и в животном теле, или это какой-либо другой род веществ — положительно неизвестно, потому что ни разу не уединен миазм в отдельности. Уединить зародыши организмов из воздуха удалось, уединили также и некоторые другие, хотя и неисследованные, органические остатки, в воздухе находящиеся. Для этой цели, например, можно исследовать ту воду, которая осаждается на холодной поверхности в жилой комнате; собрав такую воду, при ее исследовании всегда находят в ней азотистые вещества, способные подвергаться гниению и весьма быстро затем изменяющиеся. Но нет никакого доказательства на то, что эти вещества суть подобные миазмам, то-есть производящие заразу. Самый переход заразительных болезней при помощи воздуха подлежит еще сомнению. Может быть, он совершается преимущественно непосредственною передачею от одного организма к другому, или передачею при помощи прикосновения к различным предметам, например при помощи извержений, отхожих мест и т. п., как полагают другие. Есть такие факты, что в весьма близких друг к другу местностях, болотистой и нагорной, господствует или отсутствует лихорадочный миазм, чего не было бы, если бы средою для передачи служил воздух, потому что воздух соседних мест смешивается. Воздух почвы, пребывающий в ее порах, выделяется в атмосферу по мере повышения слоя уровня подземной или грунтовой воды и выносит с собою, по мнению Петтенкофера, миазматические вещества. Но воздух почвы несомненно смешивается и без повышения грунтовой воды с атмосферным воздухом, по законам диффузии; а потому есть еще много очень неясного во всем, весьма важном для человечества, вопросе о миазмах. Нельзя думать, чтобы миазм был

газ, так как он распространялся бы иначе, чем то известно относительно распространения эпидемических болезней.

Таким образом, составные части воздуха можно разделить на две главные категории, основываясь на количественном их содержании: одни составные начала воздуха находятся в большом количестве, другие, начиная с углекислого газа, в малом и все меньшем, до едва измеримых количеств. Первые легко наблюдать и определять, за ними легко следить; вторые по малости их массы трудно поддаются исследованию, но тем не менее, по важности своего влияния, должны подлежать изучению, которое год от году более и более усиливается. Значение же важнейших составных частей воздуха на столько уяснено многочисленными трудами ученых, что ныне можно составить ясное понятие о круговороте, которому подвергаются эти начала в природе. Этот круговорот и составляет причину жизненных явлений и различных перемен, происходящих на земной поверхности. Кроме того, что сказано выше, мы не будем упоминать вовсе о круговороте воды, потому что это составляет предмет, относящийся преимущественно к метеорологии и рассматриваемый в других статьях этого лексикона. О круговороте азота и об его роли в природе выше было уже говорено. Упомянем только еще об относительном круговороте кислорода и углекислого газа, напомнив, что в углекислом газе содержится кислород. Но углекислый газ неспособен вовсе производить того действия, которое производит кислород: в нем не совершается горения; горящие тела тухнут, погруженные в углекислый газ, как в воду; животные в нем умирают, как в атмосфере, лишенной кислорода; а потому увеличение количества углекислого газа имеет, в крупных чертах, такое же значение, как уменьшение количества кислорода. Такое уменьшение в количестве кислорода и единовременное увеличение количества углекислого газа и происходит при множестве естественных явлений, на поверхности земли совершающихся. Таковы в особенности дыхание животных и горение различных тел органического происхождения, то-есть растений и животных; таковы также процессы тления и гниения, в природе столь обыкновенные и совершенно сходные с процессом медленного горения. Вдыхаемый человеком воздух содержит в 10000 объемов 2100 объемов кислорода и 4 объема углекислого газа, выдыхаемый же воздух содержит около 1900 объемов кислорода и 400 объемов углекислого газа. Ежечасно взрослый человек истребляет таким образом такое же количество кислорода, какое поглощают 12 граммов сгорающего угля, развивая притом соответственное количество углекислого газа. Когда человек работает, количество развивающегося углекислого газа будет больше, потому что работа совершается в организме животных подобно тому, как она совершается в паровой машине, на счет горения углеродистого вещества, возмещаемого в организме растительною и животною пищею. Указанное количество выделяемого углекислого газа отвечает в час около 25 литрам образующегося углекислого газа и, таким образом, если бы ничто не вознаграждало траты кислорода и ничто не уменьшало количества образующегося углекислого газа, мало помалу весь кислород заместился бы в воздухе

углекислым газом, и условия для дыхания мало помалу уменьшались бы. Выше приведено было количество всего воздуха на земной поверхности, и, цитируя слова Дюма и Буссенго, можно в этом отношении выразиться так: «Предположим теперь вместе с Прево, что каждый человек поглощает ежедневно 1 килограмм кислорода и что на земле находится 1000 миллионов людей и, далее, что дыхание животных и горение органических веществ учетверяют количество истребляемого кислорода; предположим далее, что кислород, отделяемый растениями, нисколько не вознаграждает указанной траты его и покрывает только те траты кислорода, которые выше не исчислены. Конечно, мы будем иметь тогда высшую возможную меру изменения кислорода в воздухе,— в действительности она наверное будет меньше. И что же! Даже при такой невозможной гипотезе, по истечении века весь человеческий род и в три раза соответствующие ему другие потребления кислорода не поглотят его более, как 15 или 16 из тех кубов меди в километр величиною, о которых речь была выше и которых на счет кислорода приходится во всей массе земного воздуха 134 000. Таким образом, животные, населяющие поверхность земли, могут в течение целого столетия истреблять кислород и не изменят его пропорции на земле больше, как на 1/8000 его долю, а вышеприведенные предположения, конечно, будут выше возможных в природе». В самом деле же единовременно с рядом таких процессов, в которых кислород истребляется, а углекислота появляется, существует в громаднейшей мере развитый на всей земле обратный химический процесс, а именно такой, в котором углекислый газ поглощается, а кислород, в нём содержащийся, выделяется обратно в воздухе. Такой процесс совершается в растениях под влиянием солнечного света. Ночью или в отсутствии света растения также медленно горят, как и животные, то-есть поглощают кислород и выделяют углекислый газ, то-есть уменьшаются в весе, хотя и в гораздо меньшей мере, чем то совершается в животных. Но днем, под влиянием солнечного света, или непосредственно, или чрез рассеяние действующего, зеленые части растений совершают обратный процесс, оставляя в себе углерод, увеличиваясь чрез то в массе, получая вещество, способное гореть и давать каменный уголь и выделяя кислород. Так как животные живут и питаются только на счет растений и только на счет их части, то очевидно, что масса растительных веществ, образующихся вновь, превышает массу уменьшающегося животного тела; следовательно, процесс, в растениях совершающийся, не только покрывает, но и превосходит тот процесс, который совершается в животных, и, следовательно, количество кислорода в сумме убывать не будет и количество углекислоты не станет прибывать; они могут уравновешиваться в природе. Мыслим такой случай, что растительный процесс будет настолько преобладать в природе, что углекислоты не останется в воздухе, но тогда и развитие растений прекратится, следовательно, тогда начнется преобладание животного процесса, и опять появится углекислота. Существует, значит, норма или равновесие, которое и наблюдается в природе. Таким образом, круговорот кислорода в органической природе будет следующий: находящийся в воздухе несоеди-

ненный кислород поглощается животными, переходит в них в углекислый газ, сжигая часть животного организма и служа животному причиною совершающихся в нем движений, как топливо и питающий его кислород служат причиною движения паровой машины. Этот кислород выделяется из животного, значит, в виде углекислого газа, поглощаемого растением, оставляющего в нем углерод и выделяющегося из него в виде свободного кислорода в воздухе. Таким образом, кислород переходит чрез организмы и чрез углекислый газ. Углерод, в углекислом газе воздуха находящийся, выделяется из него в растении. Это совершается при расходовании той энергии, которую доставляет земной поверхности солнце; без ее затраты не только не существует, но и немыслимо разложение углекислого газа на кислород и углерод, остающийся в растении, потому что уголь, соединяясь с кислородом, то-есть сгорая, выделяет теплоту и образует углекислый газ; следовательно углекислый газ не может дать углерода и кислорода иначе, как поглотив теплоту или энергию, солнечным светом доставляемую. Значит, углерод, в растениях заключающийся, содержит в себе энергию, доставленную солнечным светом, и в этом виде поступает на пищу животного. Здесь эта энергия выделяется в теплоту в виде тепла, животному свойственного, и в виде движения, им производимого, единовременно и в причинной связи с обратным переходом углерода, бывшего в растении, в углекислый газ. Как невозможно образовать углеродистых частей растения без поглощения световой энергии, так невозможно движение животного без образования углекислого газа; оно есть не что иное, как преобразованная энергия солнечного света. Углерод сожигается в животном и дает углекислый газ, который поступает в воздух, и таким образом замыкается упомянутый круговорот углерода. Таковой же круговой процесс совершается и со всякими другими составными частями воздуха. Воздух есть та посредствующая среда, на счет которой совершаются круговые, более или менее периодические, с движением земли около оси и около солнца так или иначе совпадающие процессы.

Говоря о целой массе земной атмосферы, мы не имеем ни малейшего повода, судя по сказанному выше, подозревать случая уменьшения кислорода в воздухе или какую-нибудь другую причину в изменении ее состава, ибо нет твердого повода думать, что атмосфера земли меняется с атмосферами других небесных светил и от изменений, в них совершающихся, сколько либо зависит; а в ней самой, как целом, наступило с веками некоторое равновесие, которое и выражается ее текущим составом. Из этого, однако, вовсе не следует, чтобы в частности в каком нибудь месте или в некоторое время атмосферный воздух не мог изменяться, ибо это есть смесь, а не нечто определенное, как определенные химические соединения, и в этой смеси, как во всякой смеси газов, может совершаться убыль или прибыль одной из составных частей без нарушения однородности. В замкнутом пространстве, например в копи или в комнате, а тем более в колодце или погребе и т. п. особенных местных условиях, где воздух не смешивается или мало смешивается с окружающим воздухом, то-есть со всею его, так сказать,

безграничною или, правильнее, весьма большою массою, там воздух может подвергаться весьма значительным изменениям. Особенно интересен вопрос об изменении, которому подвергается воздух в жилом помещении. В казарме военной школы в Париже в 1847 году были произведены многие опыты относительно вентиляции, дающие поучительный пример того, что совершается и во всяком другом жилом помещении. Комната имела размеры 128 куб. метров; в ней ночевали 11 солдат. Когда окна этой комнаты были открыты в продолжение 2 или 3 часов, химический анализ воздуха всегда показывал нормальный его состав. Перед ночью окна закрывались, и когда в комнате оставались люди, окна были заперты в течение 9 часов, после чего воздух был вновь исследован. При этом были произведены различные изменения в способе закрывания дверей и в способе возобновления воздуха, то-есть вентиляции (см. это). По истечении этого времени оказалось следующее содержание углекислого газа в 10 000 объемах воздуха: 1) когда окна и двери были на все это время законопачены — 120 частей углекислого газа; 2) когда окна и двери были закрыты, но не законопачены — 70 частей; 3) когда при закрытых окнах и дверях применены были две различные обычные системы вентиляции, оказалось по истечении 9 часов 56 и 44 объема углекислого газа; 4) когда для вентиляции была устроена вертикальная труба, открывающаяся выше кровли и нагретая на 8° выше окружающей температуры (такая труба вытягивала 120 кубических метров воздуха в час), оказалось 22 объема углекислого газа. Из этого очевидно влияние щелей и других естественных в обычных жилищах причин возобновления воздуха. Без этих причин воздух внутри жилищ постоянно был бы снабжен бо́льшим количеством углекислого газа и меньшим количеством кислорода, чем нормальный воздух. При запертых окнах и дверях все-таки в воздухе жилого помещения уменьшаются условия для дыхания, что и выражается известным всем фактом различия свежего воздуха от воздуха жилого помещения. Не подлежит сомнению, что порча воздуха в жилом помещении происходит в обычных условиях главным образом не от того, что в воздухе уменьшается количество кислорода и увеличивается количество углекислоты, но от того, что в воздухе вместе с тем выделяются другие, организмом вырабатываемые, вещества, уменьшающие условия для дальнейшего пребывания животного. В самом деле, Леблан показал, что, подмешав к воздуху 30% по объему чистого углекислого газа и, следовательно, оставляя в нем только 16% по объему кислорода, получим смесь, в которой животные могут еще дышать и не подвергаются смертной асфиксии, как то происходит с ними в воздухе, выделяемом животными и содержащем только 4% углекислого газа и 19% кислорода. Значение этого опыта очевидно и указывает на положительную необходимость удалять испорченный воздух из жилых помещений не ради того, чтобы поддерживать в нем нормальное содержание углекислого газа и кислорода, но ради того, чтобы удалять выдыхаемые продукты. Однако по количеству углекислоты, содержащейся в воздухе, можно судить о мере порчи воздуха, потому что всякие другие испаряемые вещества одновременно с нею, поступают в воздух, а следовательно, и увеличи-

ваются в количестве вместе с нею. Поэтому-то для суждения о порче воздуха употребляют чаще всего способ определения количества углекислого газа. Пекле считает неизбежно необходимым ежечасно возобновлять на каждого человека по крайней мере 6 куб. метров воздуха, потому что в этом объеме уносимого воздуха может оставаться без осаждения при 15° весь выдыхаемый водяной пар; но во многих случаях применяется вентиляция, по крайней мере в 10 раз бо́льшая, для достижения действительно возможно чистого в жилом помещении воздуха, что особенно важно в тех местах, где скопляется большое число людей, как в школах, церквах, больницах, театрах и т. п.

Кроме дыхания животных, множество других причин портят воздух жилых помещений и других мест, в которых приходится работать людям, например, колодцев, погребов, рудников и т. п. Почва, содержащая всегда остатки организмов, выделяет из себя не только углекислый газ, происшедший чрез их окисление, но и разные другие продукты изменения, в почве совершающегося. Оттого чрез пол, если он не герметичен и если под ним нет вентиляции, всегда в жилище входит, так называемый, сырой, столь неприятно пахучий порченый воздух. Порча воздуха в почве может достигать до того, что прибыль углекислоты и убыль кислорода в нем доходят до таких размеров, что воздух совершенно становится не способен для дыхания и горения. Такой случай часто встречается в погребах и колодцах, куда выделяется почвенный воздух, где усиленно гниют органические остатки и где нет условий для правильной диффузии. Такие места испытываются предварительно обыкновенно при помощи зажженного фонаря, который тухнет в воздухе, вовсе не годном для дыхания. В копях случается то же самое, но там нередко бывает и другой случай, а именно — истребление кислорода без возмещения его углекислым газом, потому что в некоторых случаях кислород истребляется не органическим веществом, развивающим углекислый газ, а веществом, непосредственно поглощающим кислород и не выделяющим углекислого газа, например, сернистыми металлами; в Корнвалисе нашли в 100 объемах воздуха одного рудника только 18 объемов кислорода. В одном оставленном руднике, в почве которого содержался колчедан, нашли всего 9,5% кислорода и 90,5% азота, вовсе без угольной кислоты. Подмесь болотного газа в воздухе каменноугольных копей достигает, без опасности для дыхания и взрыва, до 3 и даже 4% по объему; при подмеси же $^1/_6$ объема воздух копей от прикосновения с зажженным телом или искрою дает сильнейший взрыв. По этой причине в каменноугольных копях работают с предохранительной лампою Дэви (см. это), и во всяких рудниках, где порча воздуха существует, его постоянно подвергают искусственной вентиляции, то-есть возобновлению.

Порчу воздуха поправляют не только при помощи возобновления всей массы воздуха, но также, хотя и менее полно, при помощи поглощения и разрушения тех веществ, которые порчу составляют. Такой способ называется дезинфекцией (см. это).

Физические свойства воздуха определяются его составом, потому что он есть смесь газов, химически не действующих друг на друга и

вследствие того смешивающихся между собою без изменения своих свойств. Это есть основное свойство газов; всякие газы, пришедшие во взаимное прикосновение, вполне проникают друг друга и образуют однородное смешение, причем тепла не развивается и объем не изменяется, если газы не действуют друг на друга химически. Такое свойство газов, изученное Дальтоном в начале этого столетия, носит название диффузии. Гипотеза, объясняющая это свойство газов, состоит в том, что газы представляют состоящими из частиц, далеко друг от друга удаленных и обладающих живою силою, вследствие которой они сами собою, без всякого внешнего побуждения, движутся с некоторою определенною скоростью, зависящею как от природы газа, так и от его температуры. При изменении давления скорость движения газовых частиц не изменяется, живая сила остается та же самая. Частицы газов, двигаясь в пространстве, ударяются о встречающиеся препятствия, и производимое газами давление есть не что иное, как явление, происходящее от этих ударов. Если газовая частица тяжела, то она и при тихом движении производит своею значительною массою при ударе действие, большее, чем более легкая частица газа, если бы эта последняя двигалась с тою же скоростью. Легкие частицы газов, двигаясь быстро, могут производить такое же действие на данную поверхность, какое производят и более тяжелые частицы газов, двигающиеся с меньшею скоростью. При этом очевидно, что давление на данную поверхность будет зависеть не только от скорости и массы двигающихся частиц, но также и от их числа. А потому, если при данной температуре некоторый газ будет увеличен в своем объеме, давление, производимое им, во столько же раз уменьшится, во сколько увеличился объем. Эта гипотеза о природе газов так хорошо удовлетворяет всем их важнейшим свойствам, что принадлежит к числу таких гипотез, которые весьма быстро в последнее десятилетие распространились в применении к изучению природы газообразных тел. По этой гипотезе проникновение или диффузия газов есть прямое следствие газообразного состояния веществ. Частицы газов движутся и так как они малы сравнительно с пространством, разделяющим их друг от друга, то пропускают частицы других встречающихся газов, и следовательно, как только газы пришли во взаимное прикосновение, их частицы распространятся однообразно во всем объеме, и давление будет везде одно и то же. По этой гипотезе понятно также и то основное свойство газов, что давление, оказываемое ими, распределяется во все стороны совершенно одинаково, потому что движение газовых частиц не определяется действием тяжести или другой силы, имеющей определенное направление, и газовые частицы двигаются во всевозможных направлениях со скоростью, им свойственною.

Воздух действительно есть простая смесь газообразных веществ, в нем находящихся. Это доказывается не только тем, что состав воздуха в некоторых условиях меняется, как было уже указано выше, но в особенности тем, что при смешении кислорода с азотом и водяным паром не происходит ни сжатия, ни охлаждения, то-есть нет ни одного признака, по которому бы можно было сказать, что смешиваемые газы дей-

ствуют друг на друга химически. Если воздух приходит в прикосновение с некоторыми растворяющими веществами, например, с водою, то каждая отдельная газообразная составная его часть растворяется независимо от остальных и в пропорции такой, какая свойственна природе газа и его давлению, а не в той пропорции, в какой составные газы входят в воздух. Действительно, воздух, растворенный в воде, может быть удален из нее при помощи кипячения, и этот выделенный воздух оказывается с гораздо большим содержанием кислорода, чем атмосферный воздух. В нем содержится около 30% по объему кислорода, а не 21%, как в атмосферном воздухе. Это зависит от того, что растворимость кислорода в воде больше, чем азота. Так как воздух есть смесь, то, зная свойства составных начал его и пропорцию, в которой они находятся в нем, можно узнать свойства воздуха. Так, например, плотность воздуха, то есть отношение между весами равных объемов воздуха и воды, можно найти, зная плотности составных начал его. В самом деле, кубический дециметр воды при температуре 4° весит 1000 граммов, такой же объем азота весит 1,26 грамма, а кислорода весит 1,43 гр.; по этому легко расчесть, что сухой воздух, содержащий только 21% по объему кислорода и 79% азота, будет весить 1,29 грамма, что и согласно с действительностью. Указанные веса газов действуют при температуре 0° и барометрическом давлении в 760 миллиметров. Воздух в физическом отношении представляют и исследуют чаще всего совершенно сухой, то-есть лишенный водяных паров и очищенный от углекислого газа и других, встречающихся в нем в малом количестве, веществ. Такой, если можно так выразиться, чистый воздух служит нормою для сличения физических свойств многих других газов. Так, например, плотности газов нередко выражают по отношению к плотности такого чистого воздуха. При этом представляется та выгода, что плотности газов меняются с температурою и давлением так же, как и плотность воздуха, а следовательно, выразив плотности газов по отношению к плотности воздуха, нет нужды прибавлять, при каком давлении и при какой температуре выражены плотности. Так, например, водород в 14,4 раза легче воздуха, и это означает, что веса равных объемов воздуха и водорода относятся между собою как 14,4 : 1, если оба газа взяты будут при одной и той же температуре и одной и той же упругости. Свойства чистого воздуха мы рассмотрим с некоторой подробностью.

Многие исследователи определяли вес кубической меры воздуха при, так называемых, нормальных условиях, а именно при температуре 0° и при барометрическом давлении, равном 760 миллиметрам. Из всех наблюдений этого рода самые полные принадлежат Реньо. Они сделаны в Париже и показывают, когда ввести в них все надлежащие поправки, что кубический дециметр воздуха весит 1,29300 грамма. Если взвешивание дециметра чистого воздуха при помощи тех же самых граммовых гирь, при той же температуре и том же давлении, произвести в любом месте, то вес будет тот же самый, несмотря на перемену напряжения тяжести; а она, как известно, меняется, например, при переходе от полюсов к экватору, а именно: на полюсе каждые 1000 весовых частей весят на 5,5 частей более, чем на экваторе. Это узнается по качаниям

маятника и можно было бы узнать при помощи пружинных весов; если же взвешивать на обыкновенных весах, то прибыль и убыль напряжения тяжести не производит никакого различия в весе, потому что действует на обе чашки весов одинаковым образом. Тем не менее, вес литра воздуха, измеренный при 0° и барометрическом давлении, равном 760 миллиметрам, меняется при разных широтах, по той причине, что давление, производимое столбом ртути, имеющем высоту 760 миллиметров, не одинаково при разных напряжениях тяжести. Если это последнее увеличивается, то и давление, производимое столбом ртути данной высоты, возрастает. Следовательно, под давлением, равным 760 миллиметрам, воздух будет сжат больше там, где напряжение тяжести будет больше. Следовательно, кубический дециметр воздуха у полюсов будет весить больше, чем на экваторе. Общепринято относить барометрические давления и другие измерения к средней широте в 45°. При этой широте литр воздуха при 0° и 760 миллиметрах давления весит 1,2925 грамма, при всякой другой широте l, вес литра воздуха определится выражением:

$$1{,}2925 - 0{,}00349 \cos 2l - 1{,}00000040\ h.$$

В этом выражении h означает высоту места наблюдения над уровнем океана, выраженную в метрах, ибо напряжение тяжести меняется с удалением от поверхности океана.

Воздух, как и другие газы, почти точно следует тому закону, который открыт в XVII столетии Бойлем и Мариоттом и который состоит в том, что объемы обратно пропорциональны давлению, или веса равных объемов во столько раз увеличиваются, во сколько увеличивается давление. По этому закону можно определить вес литра воздуха при давлении h, если известен вес литра воздуха при давлении, равном 760 миллиметрам ртутного столба. Назовем этот вес при нормальных условиях чрез e, тогда искомый вес литра воздуха при давлении h будет равен $\frac{eh}{760}$, если h выражено, как и нормальное давление, в миллиметрах ртутного столба, имеющего температуру 0°. Воздух, однако, не вполне точно следует указанному закону Мариотта: Реньо в 1847 году нашел, что при давлениях, бо́льших, чем обыкновенное давление на поверхности земли, воздух сжимается более, чем следует по закону Мариотта. По этому последнему закону, произведение из объема на давление при данной массе газа одно и то же, как бы ни изменялось давление; Реньо же нашел, что для давлений, бо́льших, чем атмосферное, это произведение постоянно уменьшается по мере возрастания давления; уменьшение это не велико, но измеримо. Так, например, если первоначальное давление было равно 739 миллиметрам, а следующее затем давление равно 1476 миллиметрам, то при первоначальном объеме воздуха в 1944 получится объем, равный 972. Это показывает, что, приняв произведение из объема на давление при 760 миллиметрах равным 10 000, мы получим при давлении, увеличенном на 1 000 миллиметров, произведение из объема на давление равным только 9985. Австрийский ученый Наттерер в 1851 году исследовал

изменение объема воздуха при больших переменах давления и нашел обратное тому, что дали опыты Реньо, а именно, он показал, что сжимаемость воздуха при значительных давлениях меньше, чем следует по закону Мариотта. Так, например, он показал, что в данном объеме, вмещающем при давлении, равном 100 метрам ртутного столба, 128 объемов воздуха, смеренного под обыкновенным давлением, вмещается под давлением в 1000 метров не в 10 раз большее число объемов воздуха, то есть не 1280 объемов, как следует по закону Мариотта, а всего только 582 объема; а при давлении в 2000 метров вмещается не 2560 объемов воздуха, а только 714 объемов его. Такого результата и должно ждать на основании того, что иначе воздух, сжимаясь, мог бы достичь плотностей, превышающих все известные плотности не только для газов, но и для твердых и жидких тел. Так, под давлением, в 1000 раз бо́льшим, чем атмосферное давление, он должен был бы быть тяжелее воды, а такое давление достигается легко при помощи гидравлических прессов и встречается в практике, например, при стрельбе порохом. На основании этого и других соображений, должно ждать, как показано мною в 1872 году, для всех газов таких отступлений от Мариоттова закона, какие нашел Наттерер для воздуха. При давлениях, меньших, чем атмосферное, а следовательно при разрежении воздуха, существуют также отступления от Мариоттова закона, и исследования (Менделеева и Кирпичева) показали, что эти отступления довольно значительны при значительных разрежениях воздуха, а именно: если давление уменьшится противу атмосферного в 70 раз, произведение из объема на давление изменится из 1000 в 960, то-есть один объем воздуха при обыкновенном давлении займет не 70 объемов при давлении, равном 1/70 атмосферного, а только объем, равный 67, противу первоначального. Хотя существуют таким образом прямые наблюдения над отступлениями от Мариоттова закона, тем не менее эти отступления малы при незначительных изменениях давления или объема, а потому в обычных расчетах для воздуха общепринято считать закон Мариотта применимым. И действительно, только точнейшими способами и весьма тщательными наблюдениями и при очень значительных изменениях объемов или давлений можно узнать отступления от указанного закона; при малых же изменениях давления и объемов отступления столь малы, что смешиваются с неизбежными погрешностями наблюдений.

Другой основной закон, дающий возможность рассчитывать веса и объемы воздуха, есть закон, данный Гей-Люссаком. Закон этот показывает изменения объема при перемене температуры и состоит в том, что все газы представляют одинаковое изменение объемов при одинаковых изменениях температуры. Для воздуха изменение объема, или коэффициент расширения при переходе от 0° к 100°, то-есть от температуры таяния льда до температуры воды, кипящей при давлении, равном 760 миллиметрам, было наблюдено неоднократно и различными способами. Точнейшие наблюдения Реньо и Магнуса сделаны однако не над изменением объемов, а над изменением упругости при переходе от 0° к 100°. Наблюдения эти показали, что, приняв упругость воздуха при 0° равною единице, при 100° получится упругость, равная 1,3665.

Если бы воздух вполне точно следовал Мариоттову закону, то из этого следовало бы, что один объем воздуха при 0° займет объем, равный 1,3665, при температуре 100°. Но так как существуют отступления от Мариоттова закона, то нет полного равенства между приращением давления и приращением объема при одинаковом изменении температуры. В самом деле, наблюдения (сделанные Менделеевым и Каяндером) показали, что при постоянном атмосферном давлении сухой воздух, переходя от 0° до 100°, изменяет свой объем от 1 до 1,3684, следовательно, на каждый градус стоградусного термометра объем изменяется на величину, равную 0,003684. Назовем чрез a коэффициент расширения воздуха, чрез t его температуру, и пусть дан объем v при 0°; при температуре t он будет равен $v(1 + at)$. Если объем воздуха v_1 смерен при температуре t_1 и желательно знать, какой получится объем v_2 при температуре t_2, то из пропорции $v_1 : v_2 = 1 + at_1 : 1 + at_2$ получим $v_2 = v_1 \frac{1 + at_2}{1 + at_1}$. Так можно найти объемы, а следовательно и веса воздуха при данных объемах его и при всевозможных температурах.

Из совокупности законов Гей-Люссака и Мариотта следует, что если в данном месте при нормальных условиях (0° и 760 мм.) вес одного литра воздуха равен e, то при давлении, равном p миллиметров, и при температуре t, вес P, свойственный v литрам воздуха, будет $P = \frac{pve}{760(1+at)}$ или $= \frac{pve}{2{,}8(271 + t)}$. Это выражение может быть легко преобразовано в более простую формулу. Чаще всего (начиная с Клапейрона) выражение совокупности названных законов (Гей-Люссака и Мариотта) приводится в метрических единицах, то-есть в метрах и килограммах, при чем P считается равным 1 килограмму, а давления p выражаются килограммами на кв. сантиметр. Так как вес кубического сантиметра ртути равен 13,5959, и так как вес куб. метра воздуха при 45° широты равен 1,2925 килогр., то, выражая давления p в килограммах на квадратный метр, а объемы v в кубических метрах, получим

$$pv = 29{,}454\ (271{,}4 + t)$$

$\left(\frac{1}{a} = 271{,}4\right.$; чаще принимают эту величину равною 273. Эта величина $+ t$ носит название абсолютной температуры$\left.\right)$. Формула эта показывает, например, что при $t = 0$ и при давлении, равном 1 килограмму на кв. метр, объем, занимаемый воздухом, равен $271{,}4 \times 29{,}45$ или 7 991 куб. метру. Эту формулу вообще выражают часто в виде $pv = RT$, где $T = \frac{1}{a} + t$, а $R = \frac{29{,}45}{D}$, если D — плотность по отношению к воздуху.

Количество тепла, потребное для нагревания одной весовой части воздуха, или, так называемая, теплоемкость его, по опытам Реньо, есть величина, не зависящая ни от температуры, ни от давления и равная 0,2376, если при нагревании давление не изменяется, а изменяется

только объем. В этом последнем случае при нагревании происходят два действия, то-есть прибавляемое тепло делится на две части: одна часть служит собственно для нагревания, для увеличения живой силы частиц воздуха, другая же часть расходуемого тепла идет на увеличение объема, потому что при этом увеличении объема преодолевается давление, под которым находится газ. Следовательно, если изменение объема происходить не будет и при нагревании не будет изменяться упругость воздуха, затрата тепла будет меньше. Она и в этом случае не зависит или почти не зависит ни от температуры, ни от давления, и тогда теплоемкость воздуха равняется 0,1685. Если теплоемкость при постоянном давлении означим чрез C, а при постоянном объеме— чрез c, их отношение $\frac{C}{c} = 1{,}41$. Оно выводится многими различными способами и первый раз выведено из скорости распространения звука в воздухе. Величина эта может быть выведена также из непосредственных наблюдений над изменением температуры при перемене давлений. Так как воздух обладает малою плотностью, следовательно, данный его вес занимает большой объем сравнительно с объемом, занимаемым таким же весом воды, и так как и теплоемкость воздуха меньше, чем теплоемкость воды, то для нагревания воздуха, вообще говоря, требуется сравнительно малая затрата тепла, что и составляет основную причину применимости воды для нагревания воздуха, на чем основано, так называемое, водяное отопление и разные другие виды нагревания жилых помещений.

Совокупность вышеизложенных основных данных для воздуха (чистого) при помощи того развития, которое получила в настоящее время, так называемая, механическая теория теплоты, дает возможность определить многие другие частные свойства воздуха, например, изменение в его температуре при сжатии или расширении. Оно определено Пуассоном и выражается весьма часто применяемою формулою: $T = N.H^n$, где $N = \frac{T_0}{H_0^n}$, а $n = \frac{C - c}{C} = 0{,}291$, T_0 и T суть начальная и конечная абсолютные температуры, H и H_0 конечное и начальное давления.

Воздух есть вещество, прозрачное как для световых, так и для тепловых лучей; это значит, что он способен передавать колебания, производящие световые и теплотные явления, подобно тому, как он передает звуковые колебания. При передаче звука самые частицы газа последовательно уплотняются и разрежаются, и эти перемены составляют самую сущность передачи звука чрез воздух, при прохождении же чрез воздух световых и теплотных лучей происходят колебания с тем эфирным веществом, которое всюду в природе предполагается и которое пронизает воздух. Оттого звук не распространяется в пустоте, тогда как пустота проводит и теплоту, и свет; пустота не проводит также и электрического разряда или, как говорится, не пропускает электричества, есть непроводник для него. Воздух же составляет более или менее совершенный проводник его, причем очень характерно следующее обстоятельство, наблюденное многими и служащее для

устройства, так называемых, Гейслеровых трубок: воздух, как и другие газы, при некотором, сравнительно очень малом давлении, легко проводит электрические разряды, причем он накаливается и светится. Воздух при давлении, близком к 5 миллиметрам, составляет отличный проводник для электрических разрядов, например, для тех, которые доставляют индуктированный ток румкорфовой спирали; при бо́льшем уплотнении воздуха, то-есть при большем давлении, он становится все худшим и худшим проводником электричества, так что чрез воздух под обыкновенным давлением электричество проходит только тогда, когда напряжение его достигает значительной величины. На этом свойстве воздуха основываются электрические явления в атмосфере. Только при значительном напряжении электричества происходит разряд его в виде молнии, а в высших слоях атмосферы существует явление точно такое же, как в Гейслеровых трубках, потому что при малом давлении воздух составляет отличный проводник электричества. Такие электрические разряды, в верхних слоях атмосферы совершающиеся, общеизвестны под названием северного сияния.

Оканчивая замечания о чистом воздухе, считаем необходимым изложить истинные причины изменения температуры в верхних слоях атмосферы. Непосредственные наблюдения, как при восхождении на горы, так и при подъемах на аэростатах, показывают, что при поднятии в высшие слои атмосферы температура уменьшается; это есть явление общее и нормальное. Бывают случаи того, что при поднятии температура увеличивается, так, например, это случается вечером в теплое время; но явление это ограничивается тогда сравнительно небольшою высотою. Воздушные путешествия Глешера показали, что в верхних слоях над Англией существуют очень часто токи теплого воздуха, имеющие направление, одинаковое с направлением Гольфштрема; происхождение их, как и теплого водяного потока Гольфштрема, конечно, одно и то же. Не говоря об этих особенных, местных и частных явлениях, вообще температура с удалением от поверхности земли то-есть с понижением атмосферного давления, уменьшается. От этой причины на некоторой высоте остается в течение круглого года вечный снег. Причину такого изменения температуры в разных слоях воздуха в прежнее время объясняли изменением теплоемкости воздуха при разных его плотностях; ныне, когда известно из наблюдений Реньо, что теплоемкость воздуха постоянна при всевозможных давлениях, такую причину изменения температуры в разных слоях воздуха должно искать в следующем. Воздух прозрачен для лучей теплоты, проходящих чрез него, достигающих до земной поверхности и ее нагревающих. Прикасающийся к ней слой воздуха от нее только нагревается. Этот слой воздуха содержит, по изложенной выше гипотезе, частицы, постоянно движущиеся, следовательно, направляющиеся в верхние слои атмосферы. Те частицы воздуха, которые в верхних слоях атмосферы находятся, также направляются частью к поверхности земли и, ударяясь об нее, приобретают от нее теплоту; следовательно, температура воздуха зависит прежде всего от температуры нижнего слоя воздуха, прикасающегося к земле. Если мы представим себе

в воздухе некоторую горизонтальную плоскость, то чрез нее, когда в воздухе существует равновесие, проходит такое же число частиц снизу вверх, какое проходит сверху вниз. Если бы этого не было, не существовало бы равновесия. Те частицы, которые идут снизу вверх, попадают из давления высшего в давление меньшее, происходит расширение, а оно сопровождается охлаждением, потому что представляет некоторую механическую работу, требующую затраты тепла. Обратно движущиеся частицы, идущие чрез упомянутую плоскость сверху вниз, уплотняются, и, как в известном с давних пор воздушном огниве, от уплотнения их развивается теплота, оттого внизу по существу должна быть температура выше, чем вверху. На основании вышеуказанных свойств воздуха можно найти, что если бы он был сух, то при поднятии на каждые 101 метр температура понизилась бы на 1° (Ц); в действительности же в горах и при аэростатических восхождениях для такого изменения температуры должно подняться на высоту, гораздо бо́льшую (150—300 метров около поверхности земли), и это объясняется присутствием в воздухе водяных паров.

В атмосферном воздухе, кроме кислорода и азота, главную массу и роль составляет водяной пар. Все прочие подмеси воздуха, хотя и имеют в нем определенную роль, по массе своей незначительны. Начиная от голубого цвета, свойственного небесному своду, и до тех изменений, которые ежедневно происходят в воздухе, свойства последнего чрезвычайно много зависят от существования в нем водяных паров. Количество существующего водяного пара в воздухе определяется точным образом, выражая упругость пара, в воздухе содержащегося. Ее находят (см. пар, влажность, гигрометр, психрометр) или определяя точку росы (гигрометры Даниеля и Реньо), или определяя температуру сухого и влажного термометра (психрометр Августа), или определяя количественное содержание воды в данном объеме воздуха. Упругость водяного пара, находящегося в воздухе, выражается в миллиметрах высоты ртутного столба, как и упругость самого воздуха. Если бы из влажного воздуха, при барометрическом давлении h, отнять всю содержащуюся в нем влажность, при упругости водяного пара, равной f, и при том сохранить и температуру, и объем воздуха, то оставшийся сухой воздух оказывал бы давление, равное $h - f$. Вес одного литра влажного воздуха поэтому легко найдется выражением

$$e\frac{h-(1-d)f}{760(1+at)},$$

где d означает плотность водяного пара по отношению к воздуху = = 0,623. Так как поэтому водяной пар легче воздуха, то и влажный воздух легче сухого при том же давлении. Та упругость f, которую имеет водяной пар в воздухе близ поверхности земли, зависит прежде всего от того, находится ли на этой поверхности вода или нет. Если ее нет, то из поверхности земли не переходит в воздух пара, а тот, который находится в нижнем слое воздуха, распределяется в верхние слои, встречает там низшую температуру, сгущается в облака, и потому тогда на поверхности земли будет находиться относительно сухой

воздух. Если же земная поверхность содержит воду, например, ею смочена или представляет растения, испаряющие воду, или даже самую поверхность воды, то тогда с этой поверхности в воздух постоянно переходят частицы водяного пара и, следовательно, близ земной поверхности пар будет постоянно содержаться. Затем величина f зависит от температуры воздуха, выше было уже указано, что при данной температуре упругость водяного пара не может превосходить некоторой величины; если она превзойдет ее при данной температуре, пар превратится в жидкое или твердое состояние, то-есть даст росу, облако, дождь или снег. Представим же себе теперь, что водяной пар находится в низшем слое атмосферы. По закону диффузии, частицы водяного пара, как частицы газа, будут переходить и в верхние слои атмосферы, а там они встретят низшую температуру, упругость не может оставаться первоначальною, из пара образуется жидкость или твердая форма воды, то-есть снежинки, и оттого-то в воздухе постоянно находятся и образуются облака, содержащие сгущенный водяной пар, происшедший близ земной поверхности. Так как при сгущении паров в жидкое или твердое состояние освобождается теплота, равная тому количеству теплоты, которое поглощается при превращении жидкой или твердой воды в пар, то от этого самого сгущения водяных паров температура верхних слоев воздуха будет выше, чем то было бы, если бы воздух не содержал нисколько влажности. Если бы на поверхности земли была температура 15° (Ц) и в воздухе не содержалось бы нисколько влажности, а давление было бы равно 750 миллиметрам, то на той высоте (приблизительно в 2,5 версты), где давление будет равно 550 миллиметрам, была бы температура около —10°, потому что на каждые 101 метр, как выше сказано, температура понижается на 1° (Ц). Если же мы представим, что на поверхности земли при температуре в 15° (Ц) воздух насыщен водяным паром, то-есть имеет упругость, равную 12,7 миллиметрам, то на той высоте, где давление равно 550 миллиметрам, температура воздуха будет равна +2° вследствие того, что на этих высотах при этих температуре и давлении может оставаться упругость около 5 миллиметров для водяного пара. Вся остальная масса воды, содержавшаяся в воздухе нижнего слоя, осядет, даст жидкость и освободит теплоту, взятую, по предшествующему, из самой земли при испарении воды. Такой расчет для изменения температуры того слоя воздуха, где давление равно 550 миллиметрам, весьма близок к действительности, потому что во многих аэростатических восхождениях, когда температура на поверхности земли была равна 15° по стоградусному термометру, а давление было около 750 миллиметров, встречена при давлении в 550 миллиметров температура, близкая действительно к 0°. Подобный же случай представляется при сравнении температуры Женевы и Сен-Бернарского монастыря в течение мая и июня месяцев. Тогда среднее барометрическое давление в Женеве равно 727 миллиметрам, а на Сен-Бернаре оно равно 565 миллиметрам; средняя температура в Женеве тогда равна 15°, а на Сен-Бернаре она равна +2,5°. Если известно изменение температуры и влажности в слоях воздуха, находящихся на высоте z метров от уровня океана, то

известно и изменение упругости воздуха. Если считать, для простоты расчета, что изменение температуры и отношения упругостей пара и всего воздуха $\left(\frac{f}{h}\right)$ пропорциональны изменениям давлений (это близко к действительности), то $\left(\text{из основного уравнения } dz = -\frac{T}{H}\frac{8000}{271}dH\right)$ выводится такая зависимость

$$z = \frac{10\,333}{e}\ln\frac{H_0}{H}\left(1 + a\frac{t_0 + t}{2}\right)\left[1 + 0{,}377\frac{\left(\frac{f_0}{H_0} + \frac{f}{H}\right)}{2}\right],$$

в которой z есть высота в метрах того места, где давление $= H$, температура t, а упругость пара f, над тем местом, где соответственные величины суть H_0, t_0 и f_0 и где при 0° и 760 мм. давления вес литра воздуха $= e$. Это есть, так называемая, гипсометрическая или барометрическая формула, выведенная Лапласом и служащая для измерения высот при помощи барометра. Она часто применяется при рассмотрении свойств воздуха. Число $\frac{10333}{e} =$ при 45° широты, величине 7429,7, на экваторе $= 8014{,}4$, называемое барометрическим постоянным, также весьма часто применяется при исследовании атмосферного воздуха.

Совокупляя в одно целое те явления, которые известны для атмосферного воздуха, можно сказать, что это есть вечно движущаяся масса, обладающая упругостью и служащая для земной поверхности тем средством, при помощи которого регулируются явления, на ней происходящие. Состояние погоды, климат, жизненные явления и большинство химических явлений, на земной поверхности происходящих, или непосредственно зависят от атмосферного воздуха, или определяются его свойствами, например прозрачностью для теплотных и световых лучей, способностью содержать водяной пар, содержанием кислорода и т. п. Всякого рода изменения, на земной поверхности происходящие, немыслимы без атмосферного воздуха. При его более или менее значительном изменении — должны измениться и явления, совершающиеся на земной поверхности.

Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft zu Berlin, 8, стр. 744—745, 1875.

ЗАМЕЧАНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНО ВОЗРАЖЕНИЯ г. ЗИЛЬЕШТРЁМА

Из опытов, произведенных мною и Кирпичевым над сжимаемостью разреженного воздуха (Bulletin de l'Ac. de St. Petersbourg, **19**, стр. 466, апрель 1874 г.), вытекало, что при уменьшении давления произведение pv (p = давление, v = объем) или, что равнозначаще, частное $\frac{E}{a}$ (E = упругость, a = плотность) уменьшается. Г. Зильештрём (Pogg. Ann., 1874, Апрель и Май) вывел из своих исследований противоположное, т. е. что pv или $\frac{E}{a}$ при этом увеличивается. Это противоречие находит объяснение (эти [1] Ber. VII, стр. 1339) в сделанных г. Зильештрёмом из его опытов на основании неправильных методов заключениях, [2] хотя неудовлетворительный способ наблюдения г. Зильештрёма уже сам по себе достаточен для мотивировки этого противоречия.

Недавно г. Зильештрём попытался (эти Berichte, VIII, стр. 576) поддержать правильность своего мнения, сопоставляя в конце статьи свои заключения с заключениями Ренью, заявляя о своем согласии с отдельными моими возражениями и, напротив, отклоняя другие.

Не имея в виду затягивать дискуссию по этому вопросу рассмотрением деталей, предоставлю на усмотрение читателя суждение о работе г. Зильештрёма и моей. Ограничиваю себя здесь изложением одного (наилучшего) числового результата г. Зильештрёма, показывающего, в какой мере его заключения соответствуют наблюденным им числам.

Зильештрём нашел в среднем, что, когда объем воздуха в 2689,43 куб. сант. при давлении 759 мм. (Pogg. Ann., CLI, стр. 462) расширяется до 1260,23 + 2689,43 = 3949,66 куб. сант., то давление уменьшается во столько раз, во сколько 1 меньше 1,47209 (l. c., стр. 577), т. е., что получается давление равное 515,59 мм. (по закону Мариотта должно было бы получиться 516,83 мм.). Отсюда он заключает (эти Ber., VIII, стр. 582), что, если pv (или $\frac{E}{a}$, как обозначает г. Зильь-

---

[1] [Под «diese Berichte» Менделеев понимает Berichte b. Deuts. Chem. Ges. *Прим. перев.*].

[2] [В оригинале стоят слова «in den von Hrn. Siljeström Folgerungen zu Grunde gelegten unregelrechten Methoden», заключающие в себе какую-то искажающую смысл описку или опечатку. *Прим. перев.*].

е ш т р ё м) принять за единицу при давлении в 1 атмосферу, то при давлении, лежащем близко к 517 мм., pv получает значение 1,000145.

Я полагаю, что этот вывод не стоит в согласии с данными наблюдений, из которых *только* г. З и л ь е ш т р ё м должен был бы вывести этот вывод, [1] так как:

Давление p мм.	Объем v в литрах	Произведение pv	Отношение произведений
759	2689,43	2041,3	1,00000
515,59	3949,66	2036,4	0,99762

то-есть *при уменьшении* p произведение pv уменьшается, как я полагал и что противоречит заключениям г. З и л ь е ш т р ё м а. Таким же простым арифметическим путем можно убедиться в несостоятельности всех остальных выводов, для чего впрочем уже был бы вполне достаточен примененный мною в моей предыдущей статье (эти Berichte, VII, стр. 1339) алгебраический путь доказательства.

Между прочим, я хочу отметить из возражения г. З и л ь е ш т р ё м а лишь то замечание, что он, как он говорит, знает к сожалению мои работы лишь из кратких сообщений некоторых журналов и поэтому не в состоянии иметь о них суждение. В настоящее время появился под названием «Опытные исследования упругости газов» (кварто, с XII таблицами, русск.) первый том отчетов о моей работе и на стр. 211—248 г. З и л ь е ш т р ё м найдет описание интересующих его наблюдений и сопоставление их с его [наблюдениями]. Во 2 главе этого труда приведены формулы, при помощи которых можно вычислить возможную и вероятную ошибки наблюдений; глава 4 содержит описание «автоматического контроля» барометров; глава 7 — внесенное в моих катетометрах изменение (они снабжены окулярным микрометром); я надеюсь, что эти главы помогут разъяснить некоторые его недоразумения. Мой труд можно получить через книжные магазины гг. Н а д е и н а или Р и к к е р а в С.-Петербурге, но если г. З и л ь е ш т р ё м пожелал бы сообщить мне свой адрес, то я охотно готов бы послать ему этот труд. Одновременно с этим мой труд посылается для библиотеки Общества.

---

[1] [В оригинале очевидная опечатка: «dieselben» вместо «dieselbe». *Прим. перев.*]

Журнал Русского Химического Общества и Физического Общества, 1876 г., т. VIII, часть физ., вып. 1, отд. I, стр. 3—5.

ВЫПИСКА

из протокола 32-го заседания Физического Общества

2-го декабря 1875 года

5) В ответ на это[1] Д. И. Менделеев сослался на свое сочинение «Об упругости газов» Т. I, стр. 45 для доказательства того, что он, как и многие другие, раньше г. Усова имел в виду зависимость сжимаемости от отношения α и α'. Вывод же, что «α при давлении 646 мм. должен быть менее 0,00366» принадлежит одному г. Усову. Если г. Усову угодно его проверить, то г. М—в готов доставить ему на то все средства своей лаборатории.[2] С своей стороны г. Менделеев считает вывод г. Усова не только невероятным, но и просто неверным и зависящим от неверного хода идей г. Усова, что г. Менделеев и обещает показать, когда разовьет, согласно данному обещанию (см. выше данную цитату, выноска), свою заметку об отношении α к α' и к сжимаемости. Теперь же г. Менделеев обращает внимание только на следующие четыре пункта: 1) в формуле Клапейрона:

$$pv = R(C + t)$$

или в более общей формуле (см. об упругости газов гл. II)

$$\frac{apv}{m} = K(C + t)$$

должно признать не только C, но и R или K за функции давления, дабы объяснить существующие в действительности отступления от законов Мариотта и Гей-Люссака. Допустив, что одно C есть линейная функция давления $= C_0(1 + Ap)$, найдем для α $\left(\text{которое} = \frac{dv}{v_0 dt}\right)$, α' $\left(\text{равного} \frac{dp}{p_0 dt}\right)$ и для сжимаемости выражения недопустимые.

2) Коэффициент расширения (а следовательно и $C = \frac{1}{\alpha}$) определяется от 0° до 100°, то-есть относится к средней температуре 50°, а сжимаемость определяется при обыкновенной температуре.

---

[1] [«Это» относится к замечанию С. А. Усова по поводу сообщения Д. И. Менделеева об определении коэффициента расширения воздуха, сделанного в предыдущем заседании. *Прим. ред.*].

[2] Ими г. Усов может воспользоваться, если пожелает, и для проверки наблюдений, сделанных г. Менделеевым с М. Л. Кирпичевым и Н. Н. Качиндером.

3) Закон Гей-Люссака, после работ Реньо, потерял общность, ныне стал условием, определяющим t. Многие стремятся уже заменить это условие другим, считая v_t равным $v_0 e^{\alpha T}$, а не принимая его $= v_0(1 + \alpha t)$. В приложениях удобнее применять этот новый вид определения температур.

4) Из данных Реньо (Relation des experiences T. I и II) следует, что

	α (коэффициент расширения воздуха при постоянном давлении)	α' (коэффициент расширения воздуха при постоянном объеме, когда p есть давление при 0°)
при p = 0,75 метра	0,00367	0,00365
2,5 „	0,00369	0,00369
3,0 „	0,00370	0,00371

а потому, идя вместе с г. Усовым, должно было бы вывести заключение, что около p = 2,5 м. сжимаемость воздуха переменяется: при меньших давлениях воздух сжимается *больше*, а при больших давлениях *менее*, чем следует по закону Мариотта. Так как опыты Реньо этого не показывают, то или в числах Реньо есть где либо ошибка, либо у г. Усова есть ошибка в ходе идей. Г. Менделеев склоняется преимущественно на сторону последнего предположения.[1]

---

[1] [На это С. А. Усов написал «Ответ г-ну Менделееву», помещенный в вып. 4 на стр. 207—209 с примечанием: «В следующей книжке будет помещено замечание от редакции журнала на настоящую статью г. Усова. Ред.» На стр. 219 вып. 5 напечатано:

«Заявление редакции физической части журнала по поводу замечания г. Усова, ответа г. Менделеева (помещенных в протоколе 32 заседания) и ответа г. Усова (выпуск 4, стр. 207).

По принятому обычаю в протоколах заседаний краткие известия о сообщениях помещаются в том виде, в каком они доставляются самими докладчиками; таким же порядком помещены замечания г. Усова и ответ. г. Менделеева.

На последний ответ г. Усова, г. Менделеев, занятый разработкою многих других вопросов, не пожелал возразить в настоящее время. Редакция физической части журнала». *Прим. ред.*].

Журнал Русского Химического Общества и Физического Общества, 1876 г., т. VIII, вып. 5, часть физ., отд. 1, стр. 212—214.

ВЫПИСКА

из протокола 36-го заседания Физического Общества

13-го апреля 1876 г.

6) Д. И. Менделеев, от имени Е. К. Гутковской и своего, делает следующее сообщение о депрессии ртути в трубках.[1]

Весьма важное значение, какое имеет капиллярная поправка на результат многих наблюдений, в которых приходится определять давления высотами ртутных столбов, служило поводом тому, что этот предмет разработан многими с теоретической и опытной стороны. После того, как Лаплас, Пуассон, Давидов и Десень разработали теорию вопроса — опытная сторона дела подвинулась очень мало. В теории капиллярности определяются ее явления в зависимости от двух величин: от постоянной (означается a^2), показывающей (при умножении на плотность) меру сцепления жидких частиц между собою и от угла встречи (означают чрез w), то есть угла между нормалями к поверхности жидкости и к поверхности твердого тела в месте их встречи. Этот угол при полном смачивании $= 0$. Для ртути он представлял величину переменную, изменяющуюся от 90° до 30°. Этого прежде не знали и считали угол встречи постоянным. Даже Десень, рассчитывая опыты Данжера, считает возможным допустить его постоянство. Легко прямым опытом убедиться в противном, что и сделал Браве.

Желая восполнить сведения о депрессии и руководствуясь ныне господствующим представлением о состоянии поверхностей жидкостей, я считал полезным получить новые, возможно точные измерения депрессии ртути в разных условиях. Начало наблюдения этого рода сделано было года два тому назад Н. Ф. Иорданским в моей лаборатории. Его числа показали уже, что ныне общепринятые значения депрессии велики. Обширный ряд очень тщательных наблюдений этого рода сделан был затем, при помощи точных измерительных средств, имеющихся в моем распоряжении, Е. К. Гутковскою.

Результаты ее наблюдений, произведенных по сие время, показывают то же самое с несомненностью, как видно из прилагаемого крат-

---

[1] Сообщенное г. Менделеевым напечатано в его книге «О барометрическом нивеллировании и о применении для него высотомера», вышедшем на днях; мы позволяем себе перепечатать сообщение дословно с самыми незначительными изменениями.

кого и предварительного из них извлечения, в котором взяты средние, интерполированные по отношению к высотам менисков.

Диаметр трубки	Высота мениска в миллиметрах							
	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8
	Депрессия в миллиметрах.							
4,042	0,82	1,20	1,47	1,93	2,30	—	—	—
5,462	—	—	0,69	0,98	1,22	1,51	—	—
8,606	—	0,162	0,235	0,312	0,380	0,458	0,530	0,610
12,717	—	—	0,055	0,078	0,103	0,122	0,140	0,153

Сравнивая эти числа с числами, разочтенными по имевшимся прежде данным и поныне существующим теоретическим представлениям, легко видеть значительные разности. Так как определения были сделаны в трубках различного стекла и несмотря на то все данные имеют большую общую стройность, то должно думать, что дальнейший разбор добытого Е. К. Гутковскою материала приведет к некоторым новым заключениям. Эти данные и их разбор будут помещены во 2-м томе моего сочинения «Об упругости газов». Укажу здесь на одно свойство, поныне, если не ошибаюсь, не замеченное и значительно упрощающее ход дальнейших соображений. Оно состоит в том, что частное от депрессии на высоту мениска, для трубки определенного диаметра, есть величина, очень мало изменяющаяся. По таблицам Поля и Шабуси (Sitzungsberichte der Math. N. Klasse der Akademie d. Wissensch. zu Wien 1852 г., т. IX, стр. 834) и по теории капиллярности следует, что с возрастанием высоты мениска, это частное уменьшается (например, для диаметра 6 мм. от 121 до 0,94, когда высота мениска меняется от 0,2 до 1,4 мм.), а по определениям Иорданского и Гутковской видно, что тогда оно возрастает. Так, например, при диаметре 12,717 мм. оно возрастает от 0,07 до 0,09, когда высота мениска возрастает от 0,8 до 1,8 мм. То же замечено во всех наблюденных до сих пор трубках. Пользуясь указанным свойством (почти постоянным частным от депрессии на высоту мениска) можно легко интерполировать данные для депрессий. Вообще, вопрос о депрессии ртути имеет важное практическое значение для точных наблюдений и чисто самостоятельный интерес, касающийся теории капиллярности, а потому и достоин полного внимания физиков, которое ему было прежде подарено, а ныне, к сожалению, утрачено. Образцовый труд: *Теория капиллярных явлений* (Москва 1851) профессора Давидова дает весь материал для математической и физической стороны вопроса за прошлое время и подвигает вперед многие стороны анализа. С того времени, хотя немало было трудов по этой отрасли физики, однако вопрос мало подвинулся вперед.

Инженерный Журнал 1876, отд. неоффиц., 1876, № 1, стр. 94—171 и № 2, стр. 269—348.

О БАРОМЕТРИЧЕСКОМ НИВЕЛЛИРОВАНИИ И ПРИМЕНЕНИИ ДЛЯ НЕГО ВЫСОТОМЕРА

[Настоящая работа, как имеющая более геофизический, чем физический характер, будет помещена в VII томе. Работа эта в значительной мере является сводкой данных, сообщенных Д. И. Менделеевым в докладах и статьях, напечатанных в этом томе].

Журнал Русского Химического Общества и Физического Общества, 1876 г., т. VIII, вып. 6, часть физ., отд. I, стр. 286—287.

ВЫПИСКА

из протокола 37-го заседания Физического Общества

4-го мая 1876 г.

6) *Д. И. Менделеев* сообщает, от имени *В А Гемилиана* и своего, о результатах опытов над сжимаемостью газов при малых давлениях. Опыты эти произведены с прибором, вновь устроенным по способу, подобному прежнему (Об упругости газов т. I), но еще далее измененному, сообразно с указаниями прежних приемов. Определения произведены в пределах давлений от 650 мм. до 20 мм. Объемы определялись по весу выливаемой ртути, а давления измерялись ртутным манометром, находящимся в сообщении с пустотою сифонного барометра и с яйцевидным сосудом, заключающим газ. Весь прибор помещался в общей водяной ванне. Во всех 8-ми сериях опытов вновь и с несомненностью оказалось, что сухой воздух между 650 и 20 мм сжимается менее $\left(\frac{\partial(vp)}{\partial p} > 0\right)$, чем следует по закону Бойль-Мариотта; притом найденные для воздуха *положительные* (об упругости газов т. I, стр. 242) отступления возрастают с уменьшением давления. Этот результат, согласующийся с наблюдениями, сделанными в четырех других приборах (гг. Менделеевым и Кирпичевым), противоречит выводу Амага, опубликованному в последнее время в Comptes Rendus (p. 914). Из своих опытов Амага выводит, что для воздуха при малых давлениях отступления равны 0; если же взять среднее из чисел, приведенных этим ученым, то оказывается, что отступления существуют и что они положительные, хотя в опытах Амага, очевидно, заключаются многочисленные поводы к погрешностям.

В тех же пределах и теми же приемами, как для воздуха, была исследована сжимаемость еще трех газов: CO^2, SO^2 и H^2. При этом были найдены положительные отступления: для H^2 между 650 и 20 мм, для CO^2 между 180—20 мм, а для SO^2 между 60 и 20 мм; отрицательные же отступления для CO^2 между 650 и 200 мм, и для SO^2 между 650 и 60 мм.

В последнее время Д. И. Менделеевым, вместе с И. Г. Богуским была также исследована сжимаемость воздуха, CO^2 и H^2 в пределах давлений от 700 до 2200 мм., при помощи весового способа определения объемов, во вновь устроенном приборе, снабженном манометром и помещенном в общей водяной ванне. В результате этих опытов оказалось, что воздух и CO^2 в указанных пределах давлений сжимается более,

чем следует по закону Бойль-Мариотта (отрицательные отступления); а водород — менее, чем требует этот закон (положительные отступления). Таким образом выводы Реньо для давления более атмосферного подтверждаются, а между тем для *всех* исследованных до сих пор газов, весьма различных по свойствам (водород, воздух, углекислота и сернистый газ), оказывается, что при некотором малом давлении все газы представляют один род отступлений *положительный*, т. е. тогда $\frac{\partial (pv)}{\partial p} > 0$. Изменение отрицательной сжимаемости в положительную для воздуха соответствует большему давлению (около атмосферного), чем для углекислого газа, а для сернистого газа такое изменение настает только при давлении, близком к 60 мм.

Журнал Русского Химического Общества и Физического Общества, 1876 г., т. VIII, вып. 6, отд. I, стр. 192.

ВЫПИСКА

из протокола заседания Химического Общества

26-го мая 1876 г.

7. В. Гемилиан от имени Д. Менделеева, И. Богусского и своего, делает краткое сообщение о результатах опытов над сжимаемостью газов при малых давлениях. Эти опыты привели к заключению, что для воздуха, углекислоты и сернистой кислоты при изменении давления от 2200 мм до 20 мм. существуют как положительные, так и отрицательные отступления от закона Бойль-Мариотта, а для водорода в этих пределах только положительные отступления. Отрицательные отступления, то-есть бóльшая сжимаемость, чем следует по закону Бойля Мариотта, замечены для воздуха, CO^2 и SO^2 при давлениях, бóльших 1 атмосферы. Положительные отступления найдены: для воздуха между 20 и 650 мм., для CO^2 между 20 мм. и 180 мм и для SO^2 между 20 мм. и 60 мм.

Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft zu Berlin, 9, 1341—1345, 1876.

О СЖИМАЕМОСТИ ГАЗОВ ПРИ ДАВЛЕНИИ НИЖЕ ОДНОЙ АТМОСФЕРЫ [1]

Д. Менделеев и В. Гемилиан

Недостаточность экспериментальных данных по этому предмету побудила одного из нас в 1872 и 1873 гг. построить последовательно три прибора для определения сжимаемости воздуха. Эти предварительные опыты показали, что сжимаемость воздуха при давлениях ниже одной атмосферы *положительна*, то есть, что $\frac{d(pv)}{dp} > 0$, если обозначить давление чрез p и объем чрез v. Следовательно pv растет при увеличении p и не остается *постоянным* $\left(\frac{d(pv)}{dp} = 0\right)$, как этого требовал бы закон Бойля-Мариотта. Так для воздуха ниже 1 атмосферы отклонения от названного закона не *отрицательны* $\left(\frac{d(pv)}{dp} \geqslant 0\right)$, то есть не те, какие были найдены Регно для воздуха при давлениях между 1 и 30 атмосферами.

Следовало однако проверить этот неожиданный результат, который мог иметь интерес для теории. С этой целью Менделеев и Кирпичев построили в 1874 четвертый прибор и в 1875 мы еще усовершенствовали методы исследования во многих деталях. Работами с различными приборами стремились не только достигнуть большей точности в наблюдениях, но также исключить из результатов влияние особенностей прибора. Однако применение ряда приборов изменило результат не существенно: отклонения от закона Бойля-Мариотта для воздуха при давлениях ниже 600 миллиметров оказались всегда положительными. Однако так как величина этих отклонений мала, то при их определении тщательность наблюдений должна была быть возможно большею. Для достижения последнего обращалось особое внимание на следующие моменты при постройке различных приборов.

1. Объем газа следует брать возможно бóльший и определять его каждый раз непосредственно взвешиванием ртути, которая вытекала из сосуда и заменялась газом. (Наименьший применявшийся объем

[1] [Перевод с немецкого. D. Mendelejeff und V. Hemilian: Über die Zusammendruckbarkeit der Gase bei Drucken unterhalb einer Atmosphäre (Eingegangen am 18 Aug.; verlesen in der Sitzung (9 October 1876) von Hrn. E. Salkowski). См. также D. Mendeleeff et V. Hemilian «Sur la compressibilité des gaz soumis aux faibles pressions. Annales de chimie et de physique, 9, 111—116, 1876. *Прим. ред.*]

составлял в различных опытах около 1000 гр. ртути). Определенный таким образом объем должен быть исправлен на изменение формы мениска в манометре, на сжимаемость сосуда (от изменения давления и от выливания ртути) и на изменение температуры.

2. Разность давлений в различных точках наблюдений должна быть как можно большею (например 600, 200, 60 и 20 миллиметров). Столб ртути должен определяться при помощи катетометра, но не из непосредственных отчетов шкалы катетометра, что обусловливает источник многих ошибок, а сравнением с тщательно прокалиброванным метром при применении окулярного микрометра, который допускает точность до тысячных долей миллиметра. Измеренная таким образом высота столба ртути должна исправляться не только на ее температуру, но и на различные капиллярные депрессии в обеих ветвях барометра[1] (диаметр барометрических трубок в различных опытах был 18—22 миллиметра) и на упругость газов в барометрической пустоте [2].

3. Температура водяной бани, заключающей в себе сосуд с ртутью и газом, должна тщательно регулироваться и определяться с точностью до тысячных долей градуса.

4. Для полной осушки прибора и газа должен применяться ангидрид фосфорной кислоты для уверенности в удалении последних следов влажности.

Если не выполнять строго все эти условия, то в опытах можно легко прийти к мало согласным между собой результатам.[3]

Подробное описание примененных Менделеевым и Кирпичевым приборов и способов находится в 1 томе Труда «Опытные исследования упругости газов» 1875 (по-русски), и краткое описание полученных ими результатов содержится в корреспонденции Кульберга в этих Berichte.[4]

В течение прошедшего рабочего года мы ввели в заново построенный прибор некоторые усовершенствования, из которых наиболее существенны следующие: a) барометр, метр и сосуд с газом и ртутью окружены одной и той же водяной баней. b) Нам удалось получать абсолютную пустоту в барометре; кроме того мы так располагали опыты, чтобы результат не зависел от упругости газа, еще остающегося в барометрической пустоте. c) Температура водяной бани в течение всего ряда опытов поддерживалась при помощи специальной мешалки почти совершенно постоянной и очень малые колебания точно определялись при помощи дифференциального термометра. d) При соединении сосуда для газа с барометром избегли не только крана, но и за-

[1] Недавно выполненные в здешней лаборатории г-жей Гутковской исследования над капиллярной депрессией ртути доставили точные данные для вычисления этой поправки.

[2] Применение открытого манометра менее точно, потому что при пользовании им в результат вводится двойная ошибка: в самом манометре и в барометре.

[3] Невыполнение этих условий достаточно для объяснения противоречивых результатов у г. Зильештрема (Pogg. Annal., 1874, Апрель и май и в Berichte, 7, 1339 и 8, 576 и 744) и Амага (Comptes Rendus, т. XIX, 466).

[4] Berichte, V, 476.

мазки, так что газ находился в соприкосновении только со стенками и ртутью.

Подробное описание прибора и методов наблюдения появится во II томе упомянутого выше труда «Об упругости газа». Мы ограничимся здесь сообщением результатов опытов с водородом, воздухом, углекислотой и сернистой кислотой между 650 и 20 миллиметрами:

1) Если, начиная с некоторого определенного давления, ниже одной атмосферы, еще понижать его, то находим для всех исследованных газов положительные отклонения от закона Бойль-Мариотта. Таким образом $\frac{d(pv)}{dp} > 0$ и сжимаемость газов меньше, чем требует этого закон Бойля-Мариотта. Такого рода отклонения, как известно, найдены были Реньо для водорода между 1 и 30 атмосферами и Наттерером для всех газов между 100 и 3000 атмосфер.

2. Для всех газов величина положительных отклонений, то-есть числовое значение $\frac{d(pv)}{dp}$ растет, когда величина начального давления уменьшается. Так, например, для водорода при

$$p = 400 \text{ миллиметров} \qquad \frac{d(pv)}{dp} = +0{,}000002$$

и при

$$p = 120 \text{ миллиметров} \qquad \frac{d(pv)}{dp} = +0{,}000010.$$

3. Для газов, подобных углекислоте и сернистой кислоте, получаем вблизи атмосферного давления отрицательные отклонения: например, для CO^2

$$p_0 = 635 \text{ мм} \qquad p_1 = 200 \text{ мм}$$
$$p_0v_0 = 10000 \text{ мм} \qquad p_1v_1 = 10029 \text{ мм}$$

но для тех же газов при меньших давлениях отклонения становятся положительными, например, для CO^2:

$$p_0 = 190 \text{ мм} \qquad p_1 = 64 \text{ мм} \qquad p_2 = 22 \text{ мм}$$
$$p_0v_0 = 10000 \text{ мм} \qquad p_1v_1 = 9996 \text{ мм} \qquad p_2v_2 = 9983 \text{ мм}$$

и для SO_2:

$$p_0 = 190 \text{ мм} \qquad p_1 = 60 \text{ мм} \qquad p_2 = 22 \text{ мм}$$
$$p_0v_0 = 10000 \text{ мм} \qquad p_1v_1 = 10010 \text{ мм} \qquad p_2v_2 = 9996 \text{ мм}$$

4. Существование для одного и того же газа положительных и отрицательных отклонений в зависимости от абсолютной величины примененного давления и близкое совпадение данных опытов убеждают нас, что полученные результаты не зависят от каких-либо постоянных источников погрешностей в методах исследования, но имеют основу в самой природе изученных газов.

5. Так как отклонения от закона Бойля-Мариотта при малых давлениях невелики, то при их определении измерения давлений, объемов

и абсолютных температур должны быть точными до десятитысячных долей этих величин, так как если, например, $p_0 = 200$ мм, $p_1 = 100$ мм, $v_0 = 2500$ гр., $v_1 = 5000$ гр. ртути,[1] то надо измерять давления с точностью до 0,01 мм, объемы — до 0,1 гр. ртути и температуры — до 0,01 градуса. Если точность при определениях меньше, то полученные результаты сомнительны.

6. Что касается сжимаемости атмосферного воздуха, то надо заметить, что найденные для него числа менее остро совпадают друг с другом, чем это имеет место у других газов. Можно было бы думать, что это зависело от какого-нибудь взаимодействия между кислородом воздуха и ртутью. Однако отклонения для воздуха между 600 и 20 миллиметрами всегда положительны. Как известно, Реньо при своих опытах с воздухом между 760 и 22000 миллиметрами нашел отрицательные отклонения; те же результаты получил Менделеев («Об упругости газов», т. I), а недавно и Менделеев и Богусский [1] между 760 и 2200 миллиметрами. Наоборот исследования Наттерера и Кальете с воздухом между 100—3000 атмосферами дали опять-таки положительные отклонения. Таким образом, мы видим, что, если начинать с давления в 20 миллиметров и увеличивать давление, то воздух сжимается сначала меньше, затем сильнее и, наконец, снова меньше, чем требует закон Бойля-Мариотта. Следовательно, знак отклонений от закона Бойля-Мариотта для воздуха меняется дважды: вблизи атмосферного давления и второй раз между 30 и 100 атмосферами.

Из всех исследованных газов только для водорода отклонения остаются положительными при всех давлениях.

Надо еще заметить, что происходящее сгущение газов на стеклянных стенках, как это принимается некоторыми учеными, во всяком случае вызвало бы отрицательные отклонения от закона Бойля-Мариотта. Следовательно, существование положительных отклонений менее сомнительно, чем отрицательная сжимаемость.

Поэтому, из опытов Наттерера и из теоретических соображений [2] для сильных давлений, с одной стороны, и из наших опытов при малых давлениях, с другой стороны, можно заключить, что для объема газа, какой может принимать определенная масса газа, существует, как минимум, так и максимум. Следовательно, определенная масса газа, если ее сжимать сильным давлением или если она рассеивается в большом пространстве, аналогична в известной мере твердому или жидкому телу; значительное изменение давления при этих условиях лишь незначительно изменяет его объем.

---

[1] Эти исследования будут описаны во II томе труда «Об упругости газов».
[2] См. «Об упругости газов» т. I, главы I и II и эти Berichte, V, 332.

Журнал Русского Химического Общества и Физического Общества, 1876 г., т. VIII, вып. 6, ч. физ., отд. I, стр. 287—288.

ВЫПИСКА

из протокола 37-го заседания Физического Общества

4 мая 1876 г.

8) *Д. И. Менделеев* сообщает, от имени *Н. Н. Каяндера* и своего, о произведенных ими определениях коэффициентов расширения при постоянном давлении различных газов, при атмосферном давлении и пределах температуры от 0° до 100°, по способу, употребленному ими раньше для воздуха. [1] Определения произведены были с следующими газами: H^2, CO, N^2, воздухом, CO^2, N^2O, SO^2, HBr и SiF^4. На числах для семи первых газов вполне выразилась следующая зависимость между коэффициентами расширения газов и их плотностями или частичными весами, а именно: *коэффициенты расширения возрастают вместе с возрастанием частичных весов газов.* Полученные числа показали далее, что это различие в величинах коэффициентов расширения газов обусловливается (не различием их химического состава) преимущественно частичными весами газов, потому что *химически различные газы, но имеющие одинаковые частичные веса* (напр., CO и N^2 или CO^2 и N^2O), *обладают и одинаковыми коэффициентами расширения.*

Два газа, HBr и SiF^4, хотя и представляют уклонения от этих правил, но эти последние объясняются с одной стороны трудностью получения этих газов в чистом виде, а с другой — происходящими во время самого опыта химическими реакциями, на что указывает, например, образование на стенках сосуда и на поверхности ртути порошковатого налета.

Числа, полученные Реньо для коэффициентов расширения газов при постоянном объеме, согласуются с вышеприведенным правилом (см. статью Менделеева в Comptes Rendus 1876, 14 Fevr. [=633—635]).

---

[1] Ж. Р. Х. О. 1875 г., вып. 8 [=215—220].

Журнал Русского Химического Общества и Физического Общества, 1876 г., том VIII, вып. 6, отд. I, стр. 191—192.

ВЫПИСКА

из протокола заседания Химического Общества

26 мая 1876 г.

З. Н. Каяндер, от имени *Д. Менделеева* и своего, сообщает об определении, при атмосферном давлении и по способу, употребленному ими прежде для воздуха, коэффициента расширения газов, имеющих различную плотность. Зависимость между коэффициентом расширения газа и его частичным весом, видимая из данных Реньо для коэффициента расширения при постоянном объеме, повторяется и здесь. Газы с одинаковым частичным весом обладают одинаковым коэффициентом расширения. С увеличением частичного веса газов увеличивается и коэффициент расширения для газов: H, CO, N^2, воздуха, CO^2, N^2O и SO^2, частичные веса которых варьируют от 2 до 64. Опыты с HBr и SiF^4, вследствие замеченных химических изменений, нельзя считать удовлетворительными.

Comptes Rendus hebdomadaires des séances de l'Academie des Sciences, Paris, LXXXII, 1876, стр. 412—415.

ОТСТУПЛЕНИЯ В ЗАКОНАХ, ОТНОСЯЩИХСЯ К ГАЗАМ

Заметка г. Д. Менделеева (извлечение)

Закон Мариотта, закон Гей-Люссака и закон Ампера и Авогадро, сделанный общепонятным Жераром, могут выразиться в совокупности уравнением

(I) $$apv = K(C + t)\, m$$ [1]

Со времен Клапейрона совокупность двух первых законов выражается уравнением

(III) $$pv = R(C + t)$$

Постоянная R изменяется с природой газа, тогда как значение K в уравнении (I) одно и то же для всех газов, поскольку они следуют этим трем законам. Формула (I) дает наиболее полное выражение свойств газов, близких к совершенному состоянию.

«Эти три закона отличаются, однако, от закона тяготения тем, что они являются только п е р в ы м п р и б л и ж е н и е м. Попытки, предпринятые, чтобы найти более приближенное выражение, — известны. Чтобы иметь наиболее простое аналитическое выражение отступлений, оказываемых газами по отношению к этим законам, надо рассматривать C и K в формуле (I), не как постоянные, но как функции природы газа, его температуры и его давления. Самый важный вопрос

---

[1] a есть вес химической молекулы, если принять атомный вес водорода за единицу: для водорода: $a = 2$; для азота: $a = 28$; для воздуха средний молекулярный вес 28,84.

p есть давление на квадратный метр в килограммах. Нормальное давление равно 10 333.

m есть вес газа в килограммах, v его объем в кубических метрах, $\frac{m}{v} = \Delta$ вес одного кубического метра газа.

Вводя это обозначение в уравнение (1), получаем более общую форму

(II) $$\frac{apv}{\Delta} = K(C + t).$$

t есть стоградусная температура; $C = \frac{1}{\alpha}$ есть постоянная, мало отличная от 272; K — есть постоянная, приблизительно равная 845; ее выражение есть $K = (c' - c)\alpha E$, если E есть механический эквивалент тепла (приблизительно 424); c' и c суть две теплоемкости газа (так для воздуха $c' = 0{,}2376$ и $c = 0{,}1685$). Так как $(c' - c)\alpha$ для всех газов мало отлично от 2, то величина K приблизительно равна $2E$.

это — знать, зависят ли эти две величины от a, p и t, или эта зависимость существует только для одной из них.

Для величины $C = \frac{1}{a}$ опыты г. Реньо доказывают, что она зависит от p и a. Несомненно, что при увеличении давления a растет и, следовательно, C уменьшается, поэтому надо иметь

$$C = C_0(1 - Ap).$$

Если сравнить данные г. Реньо с данными гг. Магнуса и Жоли, то становится очевидным, что C зависит также от a.

Для газов, которые имеют одинаковый молекулярный вес и вследствие этого одинаковый удельный вес, получается одинаковый коэффициент расширения; иначе говоря, по мере того, как увеличивается молекулярный вес a, а вследствие этого и плотность газа, увеличивается также a. Следовательно, когда одно из этих двух столь различных влияний заставляет вес единицы объема газа возрастать, то в результате коэффициент расширения a также увеличивается, то-есть C уменьшается.

Есть основание думать, что a изменяется также с t, но не надо забывать, что при современном состоянии вопроса о температурах постоянство a для такого-то данного газа есть соглашение, на котором основывается определение температур и которое не выводится из него [этого соглашения]. Таким образом величина C оказывается определенной функцией, хотя еще не совершенно известной, от p и от a. По мере того, как p и a уменьшаются, значение C стремится, повидимому, к максимальному пределу, общепринимаемому равным $C_0 = 273$. Для успеха исследований нужны новые наблюдения относительно коэффициента расширения a при постоянных давлениях.

Вопросы, относящиеся к величинам R уравнения (III) или K уравнения (I), более сложны. Тем не менее внимательное изучение приводит к предположению, что не только C, но также и K (и следовательно R) суть функции давления. Это видно уже из следующего соображения.

Исследования г. Реньо указывают, что для воздуха, для значений p, заключающихся между 1 и 30 атмосферами, сжимаемость больше той, которая вытекает из закона Мариотта (что может быть выражено чрез $\frac{d(pv)}{dp} > 0$). Теоретические соображения,[1] а также непосредственные наблюдения при значительных давлениях (Наттерер, Калльете) показывают, что тогда сжимаемость меньше той, какую требовал бы закон Мариотта $\left[\frac{d(pv)}{dp} > 0\right]$. Что же касается давлений меньше атмосферы, то наблюдения, сделанные мною совместно с г. Кирпичевым, дали [2] аналогичные результаты $\left[\frac{d(pv)}{dp} > 0\right]$.[3]

---

[1] См. мой труд, напечатанный в Артиллерийском Журнале (русском), август 1872, и мою работу «Об упругости газов», т. I, гл. I и IX.

[2] См. цитированную работу, гл. VIII. Краткое извлечение можно найти в Bulletin de l'Academie des Sciences de Saint-Pétersbourg. 1874, т. XIX, стр. 466 [=194—198].

[3] [В оригинале по опечатке во всех трех случаях стоит «<» *Прим. ред.*].

Из этого следует, что закон зависимости изменений pv от изменений p должен быть представлен сложной кривой. Что же касается изменений C с изменениями давлений, то, поскольку об этом можно судить по данным г. Реньо, они могут быть изображены почти прямой линией. Зависимости между C и p, следовательно, недостаточно для объяснения отступлений по отношению к закону Мариотта.

То же заключение вытекает из сравнения наблюдений г. Реньо над изменениями чисел α и α' (коэффициенты расширения воздуха при постоянных объемах и при постоянных давлениях) при изменениях давлений, потому что эти два коэффициента становятся равными (0,00369) при давлениях, близких к 2,50 м.[1] Продолжение этих опытов должно будет нам показать, как R и C изменяются в различных газах по мере того, как давление уменьшается или увеличивается. Что же касается настоящего времени, то мы вправе утверждать, что, при увеличении p, R и K увеличиваются, а C уменьшается. То же самое будет и для переменной a, потому что определения г. Реньо показывают, что для $p = 0{,}760$ м. $= 10333$ кгр. значения K, соответствующие различным газам, следующие:

	Водород	Азот и окись углерода	Угольная кислота и закись азота	Циан и сернистый газ
Молекулярный вес	2	28	44	52 и 64
Значения K[2]	$\frac{apv}{m(C+t)} = 844$	846 и 849	854 и 857	893 и 893

Надо заметить, что изменения K зависят особенно от изменений, каким мы подвергаем величину C.[3]

«Таким образом для того, чтобы иметь второе приближение, отношение (I), которое существует между основными свойствами газов, должно быть заменено, по крайней мере, выражением такой формы

$$\frac{apv}{m} = (K_0 + A'p + B'a)(C_0 + t - Ap - Ba).$$

Последующие исследования определят значения A, B, A', B'. Исходя из данных г. Реньо, я начал в 1872 эти исследования и напечатал первую часть их. Я имею в виду главным образом определение отступлений от закона Мариотта для газов при различных давлениях и определение коэффициента расширения газов при постоянных давлениях.

---

[1] Regnault, Relations des experiences, т. I, стр. 109 и 115.

[2] Если обозначить через δ плотность относительно воздуха, то $K = \frac{a\alpha}{\delta} = 7995$.

[3] Значения $\frac{a}{\delta}$ суть 28,9; 28,8 и 28,9; 28,8 и 28,8; 28,8 и 28,6.

Протоколы секционных заседаний V-го съезда русских естествоиспытателей и врачей в Варшаве. Варшава, 1876 г., стр. 1—2.

ВЫПИСКА

из протокола заседания секции физики и физ. географии

3 сентября 1876 г.

Д. Менделеев сделал обзор современного состояния вопроса о сжимаемости газов и вывел, что для несгущающихся газов произведение из объема (v) на давление (p) с возрастанием последнего возрастает, то-есть $\frac{d(pv)}{dp} > 0$, если давление менее или значительно более атмосферного. Поэтому настояла надобность проверки наблюдений Реньо, относящихся к давлениям, немного превышающим атмосферное, и показавших, что воздух, азот и др. представляют тогда уменьшение pv с возрастанием p. Уже публикованные Менделеевым опытные данные подтвердили вывод Реньо для воздуха, но в этих наблюдениях можно было подозревать некоторые погрешности такого же рода, как у Реньо. Поэтому в течение 1875 и 1876 г. Менделеев и Богусский устроили новый прибор и произвели наблюдения над воздухом, водородом и углекислотою. Все части этого прибора (измерительная шкала, столбы ртути и сосуды с газом) заключены в большой водяной резервуар, что устраняет всякие сомнения относительно температурных разностей. Трубка с ртутью диаметром более 18 мм. для возможного уменьшения капиллярности. Сосуды с газом окружены второю оболочкою, в которой давление единовременно увеличивается с увеличением давления внутри сосуда, чтобы уменьшить поправки на сжимаемость сосуда. Высоты ртутных столбов определялись компарациею с калиброванным метром при помощи новых катетометров, устраняющих обычную погрешность центрирования. Объемы газа измерялись каждый раз весом ртути. До сих пор замечены ряды наблюдений, относящихся к давлениям от 700 мм. до 2200 мм. Полученные числа утверждают вывод Реньо, хотя замеченные уклонения количественно различаются от Реньовских, например для воздуха уклонения от Мариоттова закона меньше, чем дает Реньо. Важнее же всего то обстоятельство, что для воздуха получились уклонения отрицательные $\frac{d(pv)}{dp} < 0$, хотя при давлениях менее атмосферного они положительны $\frac{d(pv)}{dp} > 0$. Это указывает на то, что около атмосферного давления здесь совершается изменение сжимаемости. Справедливость этого заключения видна в недавно публикованных наблюдениях Менделеева и Геми-

лиана, которые показали такую же перемену даже для углекислого и сернистого газов, хотя для них она наступает при давлениях гораздо более низких, чем для воздуха. Только для водорода при всех давлениях сжимаемость положительна $\frac{d(pv)}{dp} > 0$.

Общий вывод, который необходимо извлечь из совокупности имеющихся данных, состоит в том, что отступления от Мариоттова закона для газов представляют такую сложность, какой нельзя было ожидать.

Журнал Русского Химического Общества и Физического Общества, 1877, т. IX, вып. I, отд. I, стр. 11—12.

ВЫПИСКА

из протокола заседания Химического Общества

2-го декабря 1876 г.

4. Д. Менделеев сообщает о том, что, исправляя на широту места наблюдения давления и вводя поправку на истинное расширение ртути, получается поразительное согласие между данными для *изменения упругости* x'' воздуха, взятого при 0° под нормальным давлением при нагревании до 100°, т. е. до температуры кипения воды при 760 мм., измеренных при широте в 45°

	Число определений	x'', как дают авторы	x'', исправленное
Магнус . .	8	0,36651	0,36700
Реньо . . .	15	0,36650	0,36694
Жолли . . .	20	0,36696	0,36702

Среднее $x'' = 0{,}3670$

вместо 0,3665, которое общепринято. Истинное же изменение объемов при расширении от 0° до 100°, по определению Менделеева и Каяндера, $x = 0{,}3682$.

Журнал Русского Химического Общества и Физического общества 1877 г., т. IX, вып. 6. физ. отд., отд. 1, стр. 215—216.

ВЫПИСКА

из протокола 46-го заседания Физического Общества

5-го мая 1877 г.

3) Д. И. Менделеев сообщил от имени г. Каяндера и своего об истинных (объемных) коэффициентах расширения газов $\frac{dv}{v_0 dt}$ при разных давлениях. Приемы исследования в сущности остались те же, как и при определении коэффициента расширения воздуха под обыкновенным давлением (см. протоколы 1875 г. ноябрь [= 215—220]), но были немного изменяемы сообразно давлениям, при которых происходило определение.

Результаты суть:

1) *Коэффициент расширения воздуха* по мере уменьшения давления возрастает, приближаясь при давлениях около 150 мм. к величине 0,0037.

2) По мере увеличения давления он также возрастает и становится около 700 мм. давления 0,00376.

3) *Коэффициент расширения водорода*, начиная от малых давлений (около 150 мм.), проходя чрез обыкновенное давление и доходя до давлений в 7000 миллиметров, все время уменьшается, а именно от 0,0037 до 0,00366.

4) Для *углекислого газа* CO^2 при уменьшении давления сперва замечается уменьшение коэффициента расширения, а потом при давлениях ниже 200 мм. начинается возрастание, доходящее до 0,0037. При повышении же давления от атмосферного до 7000 мм. численный коэффициент расширения (как то уже вытекает из работ Реньо и Эндрюса) оказался сильно возрастающим и доходящим до 0,0041 при давлении в 7000 мм.

Сопоставляя эти результаты с теми, которые были получены Менделеевым и его сотрудниками: Кирпичевым, Гемилианом и Богусским, по отношению к сжимаемости названных газов, должно сделать следующие два эмпирические вывода: 1) когда сжимаемость газа, выраженная значением $\frac{d(pv)}{dp}$, имеет знак + или —, тогда изменение коэффициента расширения, то-есть величина, выраженная чрез $\frac{d^2v}{v_0 dt dp}$, имеет противный этому знак, то-есть — или +. 2) При малых давлениях, когда все газы представляют положитель-

ную сжимаемость, то-есть когда $\frac{d(vp)}{dp} > 0$, коэффициенты расширения столь различных по своей природе газов, как водород, воздух и углекислота, приближаются к одной предельной величине, близкой для 150 мм. давления к 0,0037.

Дальнейшие следствия и обобщения г. Менделеев отложил до другого раза и до появления 2-го тома сочинения «Об упругости газов».

Журнал Русского Химического Общества и Физического Общества 1877 г., т. IX, вып. 5, отд. I, стр. 192.

ВЫПИСКА

из протокола заседания Химического Общества

7 апреля 1877 г.

8. Д. Менделеев сообщает о том, что при современном состоянии сведений о парах и газах, живая сила частиц, то есть $\frac{mv^2}{2}$ есть величина постоянная, не зависящая от состава, веса и давления, и переменная только с температурой. С этим находится в связи давно известный вывод о скрытой теплоте испарения, которая для частичных количеств изменяется весьма мало, и вероятно другие физико-химические и термо-химические сведения.

Nature, т. *15*, *454—457* и *498—500*, *1877*.

ИССЛЕДОВАНИЯ НАД ЗАКОНОМ МАРИОТТА

Стр. 454—457

Выполняя Вашу просьбу, спешу сделать известным, чрез Ваш уважаемый журнал, научному миру [1] Англии результаты моих исследований над законом Бойля-Мариотта.

Особые причины, выясненные мною в русском Артиллерийском Журнале (Август 1872), побудили меня предпринять новые исследования над этим законом. Вкратце они — следующие:

1. Невозможно допустить теоретически, что под бесконечно большими давлениями газы могут быть сжаты в бесконечно малый объем; или, иными словами, что можно ввести в данный объем бесконечно большую массу сжатого газа. Хотя бесконечно большие давления практически неосуществимы, они вполне доступны воображению. Что же касается бесконечного сжатия вещества, то последнее совершенно невообразимо, иначе мы должны допустить существование атомного вещества без объема. Опыты Каньяр-Латура, развитые и проверенные г. г. Вольфом, Дрионом, Эндрьюсом и мною привели нас к неизбежному заключению, а именно, что при некоторой известной температуре все газы и пары не могут быть ни под каким давлением обращены в жидкость, но остаются в газообразном состоянии, обладающем упругостью, но лишенном сцепления. При более низкой температуре газ может быть превращен в жидкость; но при более высокой температуре он остается газом, каково бы ни было давление. Я дал этой температуре (Lieb. Ann. **119**, 11) в 1860 название «температуры абсолютного кипения»; в 1872 д-р Эндрьюс дал ей название «критической точки».

Вообразите массу газа при температуре, более высокой, чем эта температура, и предположите, что эта масса подвергается все возрастающим давлениям; если закон Бойля-Мариотта точен, то объем должен был бы уменьшаться обратно пропорционально давлению. Если мы представим себе ту же самую массу газа при температуре немного ниже температуры абсолютного кипения, то газ, превращенный в жидкость, перестанет сжиматься так, как этого требует закон Бойля-Мариотта. Следовательно, нет сомнения, что мы должны были бы прийти к парадоксальному заключению: газ может быть более сжат, чем жидкость или твердое тело. Так как есть основания считать, что кислород при обыкновенной температуре те-

[1] [В подлиннике «Scientific Public». *Прим. перев.*]

плее, чем при его температуре абсолютного кипения, то, допуская применение закона Бойля-Мариотта, при давлении в 2000 атмосфер, мы должны были бы получить удельный вес кислорода большим, чем удельный вес серной кислоты, а при давлении в 10000 атмосфер его плотность достигла бы плотности ртути. Но это невозможно допустить, судя по тому, что мы знаем о соотношении, существующем между атомным весом элементов и их плотностью как в свободном состоянии, так и в их соединениях с другими элементами. Достаточно указать, что весьма большая плотность есть особое свойство соединений, элементы которых обладают значительным атомным весом. Следовательно, нельзя допустить, что элементы, имеющие такой небольшой атомный вес, как кислород, могут быть сжаты до сколько-нибудь (весьма) значительной степени, безразлично, в каком состоянии. Мы должны таким образом à priori заключить, что при высоких давлениях закон Бойля-Мариотта неприложим.

2. Исследования Румфорда, имеющие давность предыдущего столетия и относящиеся к плотности газов, получающихся при горении пороха, а также исследования г. Наттерера над сжимаемостью таких газов, как кислород, углекислота, водород и воздух, сделанные в 1850 году и в последующие годы, вполне согласуются с высказанными выше заключениями и показывают, что под высокими давлениями газы обладают положительной сжимаемостью, аналогично сжимаемости твердых или жидких тел. Под положительной сжимаемостью я понимаю то свойство, по которому тела, по отношению к увеличению давления, уменьшаются в объеме менее быстро, чем увеличивается давление. В случаях, когда закон Бойля-Мариотта оказался точным, произведение pv давления p на объем v остается постоянным и $\frac{d(pv)}{dp} = 0$. Когда сжимаемость положительная, это произведение pv возрастает вместе с возрастанием давления и следовательно $\frac{d(pv)}{dp} > 0$.

3. В то же время г. г. Депре, Реньо и многие другие убедительно доказали, что такие газы, как угольная или сернистая кислота, которые превращаются в жидкости под высоким давлением, обладают отрицательной сжимаемостью, так что для них $\frac{d(pv)}{dp} < 0$. Г. Реньо нашел ту же отрицательную сжимаемость для воздуха, азота и углекислоты при давлениях, значительно превышающих давление атмосферы, даже в тридцать раз. Необходимо следует отсюда, что, если данные г. г. Реньо и Наттерера верны, то отрицательная сжимаемость воздуха при некотором давлении выше тридцати атмосфер становится равной нулю и далее [1] положительною. Когда $\frac{d(pv)}{dp} = 0$, закон Мариотта подтверждается. Следовательно, существует некоторое давление выше тридцати атмосфер, при котором закон Мариотта приложим, при давлениях ниже этой точки сжимаемость

[1] В тексте «therefore», повидимому, вместо «thence». *Прим. пер*

отрицательная; при давлениях выше ее она становится положительной и остается таковой до конца.

4. Хотя нет сомнений, что закон Бойля-Мариотта не приложим строго даже при умеренных давлениях, все же преобладающее, столь богатое по поучительности о природе газов, учение, которое выводит все их свойства из живой силы, оживляющей (which animates) их молекулы, допускает предположение, что при разрежении газов расстояния между их молекулами увеличиваются настолько, что их взаимное притяжение нарушается; и в таком случае газы подчиняются точно закону Бойля-Мариотта. По этой гипотезе этот закон становится пределом, к которому стремится каждый газ по мере того, как увеличивается расстояние между его молекулами, и по мере того, как их живая сила (vis viva) и быстрота их движения увеличиваются. Эта мысль не находит подтверждения в фактах. Если бы она была правильной, то при некоторой высокой температуре газы, особенно те, плотность которых не велика и частицы которых обладают весьма большой скоростью движения, должны были бы строго подчиняться закону Бойля-Мариотта; но это нельзя вообразить, так как это, на самом деле, приводит к рассмотренному выше парадоксу. Более того, исследования г. Реньо над водородом, легчайшим из газов, показали как раз противоположное, так как водород положительно сжимаем при давлениях, лишь слегка более высоких, чем атмосферное давление. Отсюда с несомненностью следует, что по отношению к уменьшению массы газа, заполняющей некоторый объем, и к увеличению скорости движения частиц мы не можем ожидать строгого соответствия с законом Бойля-Мариотта. Но мы должны убедиться в нахождении положительных отклонений,[1] и далее приводятся причины, побудившие меня прибегнуть к новым опытам по отношению к приложению к газам закона, о котором у нас идет речь.

Эти основания были выяснены мною в 1872; с тех пор подобные мысли были опубликованы многими другими. Тем не менее, насколько мне известно, эти мысли далеки от того, чтобы быть общепринятыми в науке. Очевидно, что для того, чтобы бороться с установившимся мнением, одного априорного заключения недостаточно; необходимы новые исследования — тем более, что в умах может возникнуть сомнение относительно точности опытных данных и не только таких, как данные Румфорда и г. Наттерера, но даже таких, какие установлены знаменитыми опытами г. Реньо. Изучая критически приемы последнего, выдающегося экспериментатора, мы можем оказаться не в состоянии открыть какую-либо причину для объяснения положительных отклонений, найденных им для водорода, хотя возможно допустить, что отрицательные отклонения зависят от некоторых недостатков экспериментирования. Поэтому сделались неизбежными новые опыты и исследования и—, более всего, для поверки данных г. г. Реньо и Наттерера—последующие методы, которые были бы не менее точными, чем те, какие применяли эти наблюдатели. Таким

[1] [В тексте «errors» = ошибок. *Прим. перев.*].

образом особенно необходимо было произвести опыты над сжимаемостью газов при давлениях, ниже атмосферного давления, ввиду того, что до 1872 не было точных исследований по этому вопросу.

Я распределил следующим образом работу, предпринятую мною в 1872 г.: я начал с давлений, меньших одной атмосферы, и перешел от них к давлениям, превосходившим давление, применявшееся Реньо. Для последней цели я придумал в 1872 году и теперь построил сложный манометр, который заключает в себе попеременно столбы ртути и воды и допускает измерение чрезвычайно больших давлений при помощи большого числа очень низких столбов ртути. Я не буду однако в настоящий момент останавливаться на этой стороне опытов, ввиду того, что опыты эти до сих пор еще ведутся; я попытаюсь лишь выяснить основные пункты практических операций и при малых давлениях полученные результаты. Первые экспериментальные исследования, сделанные мною над сжимаемостью воздуха при давлениях, меньших одной атмосферы, были сделаны при помощи весьма простого прибора. Вообразите сосуд A, заканчивающийся сверху и снизу трубками. Верхняя трубка всегда находится в соединении с сифонным барометром или, как я его называю, бароманометром. В этом приборе высота столба ртути измеряет упругость газа в сосуде. Легко сделать, чтобы объем газа в бароманометре оставался все время постоянным, независимо от разнообразия давлений. Для осуществления этого нужно только устроить так, чтобы мы могли по желанию увеличивать или уменьшать количество ртути в бароманометре. Нижняя трубка [сосуда] A служит для введения и удаления потребных количеств ртути. Не нужно [при этом] видеть высоту ртути в сосуде; ртуть служит здесь лишь для измерения объемов и, следовательно, если мы закроем вводную трубку краном и при помощи отводной трубки дадим всей ртути из сосуда вылиться, то мы можем узнать емкость всего резервуара; опорожняя только часть его, мы можем узнать объем газа в данный момент. Таким образом вес ртути, непосредственно наблюдаемый при помощи весов, дает сразу, во всех моих исследованиях, объем, занимаемый газом в каждом частном случае. Первые опыты, сделанные в 1873 г. над воздухом, показали мне, что воздух при давлениях, ниже одной атмосферы, обладает положительной сжимаемостью и что, чем меньше давление, тем более увеличиваются отклонения от закона Бойля-Мариотта, представляемые воздухом. Первый прибор был устроен весьма просто; можно было заподозрить некоторые ошибки, и вот отчего я не доверяю полученным [с ним] результатам. Поэтому я построил второй и третий приборы, постепенно изменяя не только размеры, но и самую конструкцию деталей приборов. Затем я построил четвертый прибор, при помощи которого произвел многочисленные наблюдения вместе с Михаилом Кирпичевым, смерть которого является чувствительной утратой для русской науки. Доклад об этих опытах был сделан мною в 1874 г. Русскому Химическому Обществу [= 193] и напечатан в Bulletin С. Петербургской Академии Наук [= 194—195]. Самые опыты описаны со значительной подробностью в главе 9 тома I моего труда «Об упругости газов». В [этой] статье невозможно описать боль-

шое число частностей, относящихся к этим исследованиям; мы ограничимся наиболее важными деталями, введенными мною в это изучение, как равным образом и в мои последующие исследования.

Нормальный метр и нормальный килограмм, применявшиеся мною, были сверены при участии г. Треска с парижскими эталонами в Conservatoire des Arts et Métiers; их деления были тогда [же] тщательно проверены.

Мне пришлось долгое время проработать над изготовлением барометра, и я нашел новый способ изготовлять этот прибор, который состоит специально в том, что конец барометрической камеры заканчивается согнутой вниз капиллярной трубкой. При помощи этой трубки возможно выгнать последние следы газа, остающегося в вакууме, и таким образом показать опыт получения абсолютной пустоты, то-есть построить такой барометр, что при уменьшении объема камеры показания не изменяются. Изготовление двух барометров с общею камерой и одной спускающейся вниз капиллярной трубкой представляет простое средство для получения, с величайшей точностью, определения самых малых давлений в барометрической камере. Надо лишь наставлять трубу катетометра на верх столба ртути в одном из барометров, когда ртуть в другом находится на своей максимальной высоте и когда объем вакуума очень мал; затем, выливая ртуть, заключенную в другом барометре и таким образом уменьшая давление, действующее на вакуум, мы можем увеличить его емкость. При этом малейшее количество газа, заключенного в вакууме, даст увеличение наблюдаемой в барометре высоты. Изготовляя барометр с величайшей тщательностью и наполняя его ртутью, перегнанною по способу Вейнхольда, возможно, как это доказали наши с г. Гемилианом многочисленные исследования, получить совершенный барометр, не требующий поправки на воздух, который мог бы остаться в вакууме. Этот результат получается единственно благодаря упомянутому выше капилляру. Способ этот, кроме того, показывает возможность изготовления барометров без кипячения ртути и без удаления их с того места, которое они в конце концов должны занимать. Это таким образом представляет несомненное улучшение конструкции столь существенного в большом числе физических изысканий прибора, как барометр.

Затем весьма большое время и большое число испытаний были необходимы для достижения желательной точности в измерениях высот. Я применяю всегда сравнительный метод, заключающийся в помещении рядом с подлежащей измерению высотой эталона метра, хорошо испытанного пред тем во всех отношениях. Мои нормальные меры имеют вообще форму трубок, внутрь которых вводится вода, что позволяет мне оценивать в каждый момент температуру меры и, если нужно, то даже изменять ее. Трубы всех моих катетометров снабжены микрометренными окулярами, тщательно изготовленными нашим механиком, г. Брауером, по справедливости известным своим долговременным пребыванием в Пулкове и изготовлением большого числа астрономических и магнитных приборов. Кроме центральных перекрестных нитей микрометренный окуляр снабжен подвижной

нитью или, еще лучше, двумя подвижными нитями. Неподвижные нити, проходящие чрез оптический и геометрический центр трубы, снабженной уровнем, чувствительным до около 2—3″, направляются на точку объекта, высоту которого надо определить. Затем обе трубы, прикрепленные к одному и тому же катетометру или, лучше, к двум отдельным небольшим катетометрам, направляются на нормальную меру, расположенную сбоку, и двойная подвижная нить служит для определения расстояния неподвижной нити от ближайших черточек нормальной меры. Эта последняя помещается на таком расстоянии от столба, высоту которого определяют, чтобы мера и объект могли быть отчетливо видимы без перемещения положения окуляра. Всякое изменение в положении окуляра может нарушить положение оптического центра; вот отчего я в последнее время применяю исключительно трубы катетометров, у которых расстояние окуляра от объектива не может претерпевать каких-либо изменений. С другой стороны, возможно перемещать трубу, если сам катетометр находится в покое [в том месте], где он укреплен, что нередко нужно на практике. Применяя весьма тщательно комбинированные значительный увеличитель и осветитель столбов ртути, возможно наблюдать эти столбы с точностью, доводимой до тысячных миллиметра, так что ошибка в определении высоты не превышает 0,01 мм. Каждый, кто работал с обычными катетометрами и применял их шкалы для измерения высот, знает, что точность измерения при помощи такого прибора никогда не превышает 1/25 мм. и что часто он делает ошибки, достигающие десятых миллиметра. Достаточно сослаться на изменения температуры, неизбежно зависящие от присутствия наблюдателя. В конструкции, примененной мною, эти причины, равно как и многие другие причины ошибок, совершенно отсутствуют.

Хотя я всегда применяю для барометров и бароманометров трубки большого диаметра, превосходящие 17 и даже очень часто 20 миллиметров, все же я счел подходящим проверить капиллярную депрессию ртути, зависящую от различных диаметров трубки и различных высот мениска. Весьма обширное исследование было произведено в моей лаборатории г-жей Гутковской, и результаты, которые она получила, заставили меня изменить данные, какими мы обладаем относительно депрессии ртути. Приведу один пример из многих, имеющихся в моем труде «Барометрическое нивеллирование и о применении для этой цели высотомера» [=62.3].[1] Если диаметр трубки 8,606 и высота мениска

0,6 0,8 1,0 1,2 1,4 миллиметра,

то депрессии суть

0,162 0,235 0,312 0,380 0,458 миллиметра

— числа, отличающиеся от общепринятых, согласно которым для высоты мениска 1,0 должна была бы быть депрессия в 0,460 при диаметре 8,606.

(Продолжение следует).

[1] [В тексте «Syssotomer». *Прим. перев.*].

Д. Менделеев[1]

Стр. 498—500

Из исследований над депрессией ртути вытекает возможность введения точной поправки относительно объема газа, заключенного между поверхностью ртути и горизонтальной плоскостью, касающейся вершины мениска. Во всех моих исследованиях я каждый раз ввожу поправку, относящуюся к этому объему.

Объем резервуара, содержащего ртуть и газ под различными давлениями, подвержен двоякого рода изменениям; во первых, тем, которые зависят от разности давлений, действующих с двух сторон на сосуд, и, во-вторых, тем, которые зависят от изменений объема ртути. Сжимаемость резервуаров, применявшихся в исследованиях, всегда определялась опытом и их изменение объема, вызываемое введением ртути, может быть определено посредством окружения сосуда, наполненного ртутью, другим, наполненным тем же веществом. Когда высота в обоих сосудах одинакова, емкость сосуда — та, какая имеет место во время равенства давления на внешнюю и внутреннюю поверхности сосуда. Если мы опорожним часть внешнего сосуда, емкость сосуда изменяется таким же образом, как при наполнении или опоражнивании сосуда. Опыты этого рода показали возможность определения изменений емкости, зависящих от количества ртути. Соответствующие поправки вводились в вычисления в каждом случае.

Всю практическую сторону предмета — осушку газа, полное удаление остатков газа из прибора, герметическое соединение частей прибора посредством замазки и ртутных затворов, способы поддерживания газов и ртути при постоянной температуре, калибровку трубок и многие другие детали — пришлось более или менее заново разработать. Все это можно найти в моем труде «Об упругости газов». Я напечатал этот труд только по-русски, не имея достаточных средств для опубликования перевода столь объемистого труда и желая следовать обычаю, существующему среди ученых всех стран, описывать свои работы на их родном языке с целью внесения в научную литературу страны, где они живут и работают, вклада, соответствующего их силам.

Моим желанием было исследовать предмет в его мельчайших подробностях для того, чтобы исключить всякую возможность сомнения на счет причин, определяющих наблюдаемые отклонения от закона Бойля-Мариотта. Я знаю, что этот закон твердо установлен и верю, что он таким и останется. Не менее велика умственная уверенность в том, что разреженные газы приближаются к идеальному состоянию. Эту уверенность я тоже имел, приступая к своим опытам. Поэтому было необходимо как можно полнее определить все обстоятельства, от которых зависят факты, противоречащие общепринятому мнению. Вот отчего я видоизменял приборы, улучшал методы и затратил на эту работу без перерыва более трех лет. Теперь, поскольку касается низких давлений, работа закончена, и я получил определенно

[1] [В оглавлении же стоит «Prof. De Mendeleef». *Прим. перев.*].

достоверные доказательства строгой точности моих первых наблюдений.

Опыты, произведенные мною с г. Кирпичевым, доказали, что не только для воздуха, но и для водорода и даже для угольной кислоты, отклонения положительны, когда газ подвергается весьма низкому давлению; более того, оказалось, что эти отклонения увеличиваются по мере отклонений от нормального давления. То же самое было найдено в новой серии опытов, предпринятых мною с г. Гемилианом. Эти опыты описаны в т. II моего труда относительно «Упругости газов», который я только что опубликовал. Краткое извлечение по этому вопросу напечатано в Ann. de Chimie et de Physique, Октябрь, 1876 [=629—632]. Я приведу лишь результаты, полученные нами из опытов, сделанных в 1875 г. и в начале 1876 г.

В новый прибор мы ввели несколько дальнейших усовершенствований, из которых главнейшие: 1) барометр, метр и резервуар, содержащий газ и ртуть, были помещены в ту же самую баню, наполненную водою; 2) нам удалось производить полный вакуум в барометрической камере; 3) баня поддерживалась при почти однородной температуре при посредстве мешалки, и небольшие различия в температурах различных слоев определялись дифференциальным термометром; 4) соединение между резервуаром для воздуха и барометром было сделано не только без помощи крана, но также и без применения замазки.[1] Таким образом газ был окружен только стеклом и ртутью. Мы ограничимся сводкой результатов наших опытов, произведенных между давлениями в 650 и 20 миллиметров над четырьмя газами — H^2, воздух, C^2 и SO^2.

1. Если, начиная от некоторого определенного малого давления, мы дойдем до еще меньших давлений, то для всех газов получаются положительные отклонения, а именно $\frac{d(pv)}{dp} > 0$; газы, следовательно, в этом случае сжимаются меньше, чем требует закон Мариотта. Аналогичные отклонения наблюдались также г. Ренью для водорода между 1 и 30 атмосферами и г. Наттерером для всех газов между 100 и 3000 атмосфер.

2. При малых давлениях и для всех газов значение положительных отклонений, т. е. численное значение (или величина) $\frac{d(pv)}{dp}$, увеличивается при уменьшении начального давления. Так, например, для водорода при 400 миллиметрах —

$$\frac{d(pv)}{dp} = +0{,}000002,$$

а при 120 миллиметрах —

$$\frac{d(pv)}{dp} = +0{,}000010.$$

[1] Для достижения этой цели сосуд для газа и ветвь барометра были спаяны друг с другом при помощи капиллярной трубки, сделанной из одного куска.

3. Для газов, подобных CO^2 и SO^2, мы получаем вблизи атмосферного давления отрицательные отклонения; например, для CO^2, $p_0 = 635$, $p_1 = 200$, $p_0v_0 = 10000$, $p_1v_1 = 10029$; но, при еще меньших давлениях отклонения становятся положительными даже для CO^2 и SO^2. Например, для CO^2, $p_0 = 190$, $p_1 = 64$, $p_2 = 22$, $p_0v_0 = 10000$, $p_1v_1 = 9996$, $p_2v_2 = 9983$; для SO^2, $p_0 = 190$, $p_1 = 60$, $p_2 = 22$, $p_0v_0 = 10000$, $p_1v_1 = 10010$, $p_2v_2 = 9996$.

4. Существование для одного и того же газа в зависимости от величины давления положительных и отрицательных отклонений, наблюдаемых посредством одного и того же прибора, и согласие различных рядов опытов доказывают, что полученные результаты не зависят от каких-либо постоянных ошибок в примененных способах, но что они действительно обусловлены природою и существенными свойствами исследованных газов.

5. Так как отступления от закона Мариотта при очень малых давлениях весьма малы, необходимо при определении их делать отчеты давлений, объемов и температур абсолютных $(t + 273°)$ [1] с точностью до двухтысячных их полных значений; так, например, если $p_0 = 0{,}200$ м. $p_1 = 0{,}100$ м. и $v_0 = 2500$ гр., $v_1 = 5000$ гр. ртути ($t = 20$), будет необходимо определять давления с точностью до 0,01 мм., объем — до 0,1 гр. ртути и температуры до 0,01 градуса.

Результаты будут сомнительными, если точность будет меньше. [2] Таким образом найдено, что *при некотором определенном малом давлении газы представляют положительные отклонения от закона Мариотта*; даже газы, подобные сернистой кислоте и угольной кислоте, которые при высоких давлениях обнаруживают значительные отрицательные отклонения. То же имеет место для воздуха. Г. Реньо начинал свои исследования с давлений, превосходящих атмосферное, и получил отрицательные отклонения.

В 1874 я произвел со всею возможною тщательностью определение этих отклонений для воздуха при давлениях от 650 до 2000 миллиметров и к концу 1875 и в начале 1876 г. в специальном приборе, снабженном сложным манометром, я повторил с г. Богусским те же опыты для давлений от 700 до 3000 миллиметров с воздухом, водородом и угольной кислотой. Эти исследования показали строгую точность заключений г. Реньо. Воздух и угольная кислота оказались подверженными при этих давлениях отрицательным отклонениям, бо́льшим для угольной кислоты, чем для воздуха; а водород для тех же самых давлений оказался дающим положительные отклонения. В настоящее время мы продолжаем того же рода опыты для давлений выше трех метров.

Таким образом водород при всех давлениях, начиная от нуля и кончая бесконечно большим давлением, дает сплошь положительные откло-

---

[1] [В тексте опечатка: «$t = 273°$»].

[2] [Этими причинами достаточно объясняется недостаток согласия в опытах Зильештрема (Pogg. Ann., апрель и май 1874; см. также Bull. de l'Acad. des Sc. de St. Pétersbourg, 19, 466 и Berichte der deutschen chem. Gesell. 7, 339; 8, 576 и 749) и г. Амага (Comptes Rendus, 17 апреля 1876).

нения; ни при каком давлении он не следует строго закону Бойля и никогда не дает отрицательных отклонений. Повышенное давление всегда дает больший объем, чем тот, который должен был бы получиться согласно изменению давления. Воздух при давлениях, ниже 600 миллиметров, также представляет положительные отклонения; но при давлениях больше атмосферного давления его отклонения становятся отрицательными и при давлениях, превосходящих 100 атмосфер, его сжимаемость снова становится положительною. Следовательно для этого газа есть два давления, при которых он следует закону Бойля; одно находится очень близко к атмосферному давлению, другое лежит между 30 и 100 атмосферами. Эти давления, при которых имеет место изменение знака сжимаемости, будут иными для углекислого газа; именно, при давлениях ниже атмосферного изменение знака оказывается при приблизительно 200 миллиметрах, а для более высоких давлений оно начинается около давления, соответствующего 70 метрам ртути, если мы основываем наши исследования по этому вопросу на наблюдениях Д-ра Эндрьюса над сжимаемостью угольной кислоты при температуре выше 31°. Для более низких температур эта точка будет, вероятно, соответствовать переходу угольной кислоты в жидкое состояние. Следовательно, при изменении температуры давление, при котором имеет место изменение знака сжимаемости, также изменяется. Для сернистой кислоты знак сжимаемости при давлениях, более низких, чем атмосферное, изменяется около 40 миллиметров давления. Но даже этот газ, так легко ожижаемый, при низких давлениях имеет всегда положительную сжимаемость. Поэтому нет — и не может быть — газа, который строго подчиняется закону Мариотта при малых давлениях.

Идея абсолютного газа принадлежит поэтому к числу фикций, не находящих себе подтверждения в фактах. Мы не можем поэтому предположить, что при уменьшении плотности или при увеличении живой силы (vis viva) газовых частиц, газы приближаются к состоянию, в котором они подчиняются закону Бойля. Тогда (при уменьшении плотности, при увеличении скорости частиц, то-есть, при уменьшении давления, при повышении температуры и при уменьшении молекулярного веса) все они стремятся к другому состоянию, характеризуемому выражением $\frac{d(pv)}{dp} \gtrless 0$; т. е. они уподобляются твердым и жидким телам, когда сгущение достигает своего предела. Мы должны признавать,[1] что есть предел сгущению и предел разрежению. В самом деле, если мы возьмем массу нелетучей жидкости и если мы подвергнем ее бесконечно большим и бесконечно малым давлениям, то мы увидим, что она изменяет объем; но в этих двух случаях мы будем иметь конечные объемы, которые можно измерить и которые будут даже мало отличаться друг от друга для одного и того же тела. То же будет для газов, если мы допустим, что для давлений, приближающихся к нулю, газы сжимаются по тому же закону, как тот, какой мы можем вывести из наших опытов

[1] [В тексте «believe». *Прим. перев.*]

над сжатием при давлениях, ниже атмосферного, или по закону, по какому сжимается водород. При больших давлениях или при чрезвычайно малых давлениях каждый газ напоминает твердое или жидкое тело и обладает двумя пределами сжимаемости. Объемы, соответствующие этим пределам, весьма различны, но есть всегда основание признавать, что они существуют.

Не пускаясь в гипотезы для объяснения этих предельных объемов (такие, как, например, предположение, что частицы сами по себе обладают объемом), я ограничусь вопросом о веществе небесного пространства. Что также световой эфир. Одно из двух — либо независимое упругое вещество своего рода (sui generis), либо значительно разреженный газ атмосфер небесных тел. В последнем случае необходимо допустить отсутствие пределов в атмосферах и все большее и большее сгущение эфира по мере приближения к небесному телу (солнце или планета). Есть много доводов за и против обеих гипотез. С одной стороны, спектральный анализ приводит нас к заключению, что материал всех небесных тел одинаков; с другой стороны, он доказывает различие в составе атмосфер. Вот почему мы воздерживаемся от решения вопроса по существу. Но спектральный анализ говорит не меньше в пользу первой гипотезы, так как он показывает отличие состава нашей земной атмосферы от состава многих других небесных тел. В исследованиях по сопротивлению небесной материи движению планет есть, повидимому, также подтверждение первой из этих двух гипотез, так как ни планеты, ни кометы не обнаруживают какого-либо уменьшения эксцентриситета их орбит [уменьшения], которое было бы неизбежным следствием движения в разреженной среде, как это наблюдено в случае кометы Энке. Точные исследования движения этой кометы, в недавние времена повторенные Пулковским астрономом г. фон-Астеном, ясно указывают на приближения к солнцу в перигелии, хотя вначале г. фон Астен и не заметил их. Однако эта комета в перигелии оказалась лишь на трети расстояния, отделяющего солнце от земли, т. е. она была ближе к солнцу, чем Меркурий. Возможно, что она прошла близко к пределам солнечной атмосферы. Комета Файя, как известно, не представляет тех же самых расхождений, но ее перигелическое расстояние около 1,68, тогда как у кометы Энке оно лишь около 0,33; следовательно, оно настолько его превосходит, что их сравнение могло бы лишь послужить подтверждением гипотезы солнечной атмосферы. Если мы допустим предел для атмосфер, то мы должны ожидать у газов при малых давлениях как раз тот род отступлений от закона Бойля, какой я наблюдал у разреженных газов.

Доказывать, что газы при очень малых давлениях, равно как при весьма значительных давлениях, отступают от закона Бойля-Мариотта, несомненно,— то же самое, что отрицать справедливость этого закона; я чувствую, что мне следовало бы высказать это более ясно. В течение долгого времени закон тяготения не мог быть согласован с возмущениями; впоследствии эти возмущения оказались лучшим подтверждением законов тяготения. В настоящем случае может быть то же самое. Есть три закона для газов: закон Бойля и Мариот-

та, $pv = \text{пост.}$; закон Гей-Люссака, $v_t = v_0(1 + \alpha t)$; и закон Ампера и Жерара[1] $\frac{av}{m} = \text{пост.}$ (где a — молекулярный вес, а m — масса). Их *совокупность* выражается для всех газов в общем виде уравнением

$$apv = 845\ (273 + t)\ m,$$

где a — атомный вес (H = 1), p — давление в килограммах на квадратный метр, v — объем в кубических метрах, m — вес в килограммах, t — стоградусная температура. Это однако есть лишь первое приближение. Во второй части уравнения должны быть дополнительные члены, выражающие функцию от p и a, которая очень мала для обычных средних значений p и становится заметной величиной только тогда, когда p очень мало или очень велико. Нахождение этой функции — дело будущего и потребует трудов большого числа экспериментаторов. Моя цель — дать возможность доставить некоторые экспериментальные данные, которые позволят судить о форме этой функции. Эта работа требует многих новых приемов измерительных приборов высокой степени точности, многих разнообразных приспособлений, равно как опытных помощников. Эта идея обеспечила мне покровительство его императорского высочества великого князя Константина и поддержку Императорского Русского Технического Общества.

Этим я заканчиваю мое сообщение, которое я имею честь послать вам. Исследования над коэффициентами расширения газов в их общих чертах подтверждают точность заключений, выведенных из наблюдений над сжимаемостью. Но этот вопрос находится в стадии разработки и только часть исследований закончена. Я удерживаюсь вследствие этого от изложения всех подробностей предмета. Замечу только, что истинный коэффициент расширения воздуха при постоянном давлении и переменном объеме оказался для давлений, близких к атмосферному давлению, больше общепринятого числа, а именно из исследований, которые я произвел с г. Каяндером, он равен 0,003683, если мы примем за 100° Ц. температуру кипящей воды при атмосферном давлении в 760 мм. на широте 45°.

Если вы найдете небезынтересным более распространенные подробности по этому вопросу, а также по определению веса литра воздуха, я буду иметь величайшее удовольствие изложить английской публике чрез ваш интересный журнал основные черты исследований, сделанных по этому вопросу в моей лаборатории.

С. Петербург, 1 января.

---

[1] [В тексте опечатка: «Герланда». *Прим. перев.*]

Основы Химии, 3-е издание 1877 г., часть I, главы I и X: часть II, глава XXV.

ВЫПИСКИ ИЗ 3-ГО ИЗДАНИЯ ОСНОВ ХИМИИ

Часть I, глава I

Вещества и явления, изучаемые химией

Стр. 34

Диффузия газов проще всего объясняется при том, ныне общераспространенном представлении, что **частицы газов находятся в постоянном** (во все стороны — от столкновения) **движении**, скорость которого зависит от температуры и природы газа, а именно от его плотности. Два газа, плотности которых относятся, как a : b, будут вытекать во времена, относящиеся, как $\sqrt{a} : \sqrt{b}$, а следовательно их частицы движутся со скоростями, относящимися как $\sqrt{b} : \sqrt{a}$ (ибо скорости, то-есть пути, проходимые в 1 времени, обратно пропорциональны временам, в которые совершаются определенные пути). Поэтому, если при 0° **скорость движения** частиц водорода принимается = 1860 метров в секунду, то частицы кислорода, который в 16 раз плотнее водорода, в секунду проходят 465 метров.

Глава X

Атомическая гипотеза о строении вещества. Закон паев

стр. 317—318

Приводим некоторые данные (напомнив, что во 2-ой главе и в начале книги даны для элементов атомные веса, какими мы пользуемся), выражающие **соотношения между физико-механическими свойствами тел и атомными или частичными весами.**

На первом плане стоит вполне общее соответствие атомных весов **с плотностями газов и паров** простых и сложных тел, выражаемое равенством 2D = P, где D есть плотность газа или пара по отношению к водороду, а P есть вес частицы (опять принимая водород, то-есть вес его атома, за единицу) простого или сложного тела, находимый из состава или из суммы атомных весов элементов, входящих в формулу, отвечающую составу. Так вес P, соответствующий составу HCl, есть 36,5 (так как H = 1, Cl = 35,5), а потому плотность D хлористоводородного газа по отношению к водороду = 18,25. Это и другие подобные следствия из закона 2D = P согласны с опытом. Закон этот общ,

весьма важен для химии и мы его рассматриваем особо в XVI главе, а потому здесь над ним более не останавливаемся. Заметим только, что величина P (или кратная ей) определяется химическим составом и превращениями, согласованными с атомным учением, а величина D определяется совершенно помимо того прямым взвешиванием (газа или пара и водорода в тех же условиях), а потому соотношение 2 D=P принадлежит к числу связывающих величины, добываемые независимо друг от друга.[1] Сверх того заметим, что множество **других свойств газов** определяется их плотностью, а следовательно и их весом частицы. Такова, например, диффузия (стр. 33). Она (стр. 34) указывает относительную скорость движения газовых частиц. Скорость движения частиц разных газов при данной температуре $v = \frac{C}{\sqrt{D}}$ (постоянной C, деленной на квадратный корень из плотности). Если P выражает относительную массу частиц какого-либо газа, то живая сила (выражаемая чрез $^1/_2 mv^2$, где m — масса и v — скорость) каждой частицы газа $= {}^1/_2 Pv^2 = {}^1/_2 PC^2 \frac{1}{D} = {}^1/_2 2 DC^2 \frac{1}{D} = C^2$, то-есть (при постоянной температуре) **живая сила движения всяких газовых частиц есть постоянная величина,** не зависящая ни от природы газа, ни от веса частиц, а только от температуры. Это есть одно из следствий допущения атомного учения и понятия о газах, как заключающих движущиеся частицы.

Из множества других изученных свойств **газов** упомянем для примера **о скорости распространения в них звука.** Эта последняя $= \frac{\sqrt{kHg}}{D}$. $(1 + ht)$, где H есть упругость газа (выраженная в весе), g — напряжение тяжести, h — коэффициент расширения, t — температура, D — вес куб. меры газа, k — отношение двух теплоёмкостей газов,[2] а потому, если при данной температуре и упругости сравнить скорости двух газов, то они окажутся обратно пропорциональными квадратным корням из плотностей или из весов частиц. А потому, зная скорости звука в двух газах — узнаем отношение их частичных весов (если k известно, или узнаем k — если D известно).

Часть II, глава XXV

О теплоёмкости

Стр. 781

Для газов отличают теплоёмкость при постоянном давлении c′ (эту величину мы выше обозначали чрез Q) и при постоянном объеме c. Эта последняя есть та, которую мы называли выше чрез K. Очевидно, что **отношение обеих теплоёмкостей** k, судя по вышеизложенному,

---

[1] Подобная зависимость, повидимому, независимых переменных и составляет закон, истинное приобретение точного знания.

[2] Величина k для обыкновенных газов, содержащих 2 атома в частице, близка к 1,4. Она выражает отношение теплоёмкости при постоянном давлении к теплоёмкости при постоянном объеме. О ней см главу 25-ую.

равно отношению Q к K, или = отношению 2,45 n + 2 к 2,45 n. При n = 1 это отношение k = 1,8, при n = 2 k = 1,4, при n = 3 k = 1,3. При весьма большом числе частиц = 1, то-есть отношение обеих теплоёмкостей уменьшается от 1,8 до 1,0 по мере увеличения числа атомов в частице от 1 до бесконечности. И это следствие, оправдываемое прямым наблюдением. Для таких газов как H^2, O^2, N^2, CO, воздух и др. для которых n = 2, величина k, определяемая многими способами, излагаемыми в физике, (например, по изменению температуры при, перемене давления, по скорости звука и т. п.), оказывается действительно близкою к 1,4, а для таких газов, как CO^2, NO^2 и др. она близка к 1,3. В недавнее время (1875) Кундт и Ворбург определили при помощи довольно грубого способа, упомянутого в главе X, стр. 317, k — для ртутных паров, для которых n = 1, и нашли k = 1,6, то-есть величину бо́льшую, чем для воздуха, как и должно было ждать.

Стр. 782

Отступления могут быть и замечаются особенно для паров, а тем показывается, что при этом нельзя пренебрегать внутреннею работою, которая оказывается для паров и газов не только в отступлениях от законов теплоёмкостей, но и в неравенствах коэффициентов расширения разных газов. Опыты Реньо, Магнуса, Жоли и Менделеева с Каяндером показывают, что по **мере возрастания частичного веса возрастаются** или вообще изменяются **оба коэффициента расширения газов,** а именно и α — (истинный коэффициент), показывающий изменение объемов, и α', то-есть коэффициент изменения упругости при постоянном объеме при перемене температуры от 0° до 100°. Этот последний для водорода (p = 2) = 0,365, для азота CO (p = 29) = 0,367, для CO^2 и N^2O (p = 44) = 0,371 и т. д.

Основы Химии. 4-ое издание 1881 г., часть I, главы I, IV, V.

ВЫПИСКИ ИЗ 4-го ИЗДАНИЯ ОСНОВ ХИМИИ

Часть I, глава I

Вещества и явления, изучаемые химиею

Стр. 28

Это различие в скорости движения газовых частиц, в зависимости от их плотности, можно показать прямым опытом.

Газ, употребляемый для освещения, легче воздуха (отчего и употребляется для наполнения аэростатов или шаров, плавающих в воздухе), а потому его присутствие в воздухе (очень опасное по взрыву и пожару, могущему произойти от этой причины) может быть открыто диффузиею.

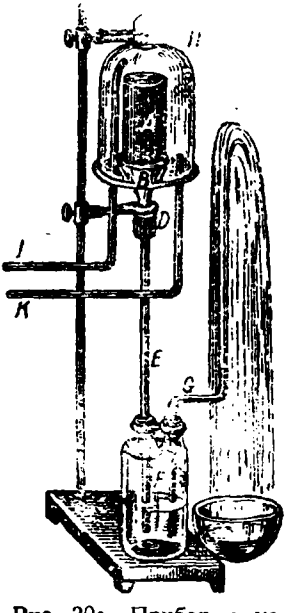


Рис. 30а. Прибор, в котором при диффузии водорода и углекислоты образуется фонтан

Стр. 28—30

Очевидно, что мало помалу плотности по обе стороны пластинки уравняются (притом, от увеличения давления из под пластинки станет вырываться больше газа) и тогда опять количество проскакивающих изнутри и извне частиц будет одно и то же.

Особенно ясною и поучительною становится диффузия газов тогда, когда она происходит между газами, столь различными по плотности, а следовательно и по скорости движения частиц, каковы, например, водород и углекислый газ. Последний в 22 раза тяжелее первого, а потому чрез тонкие отверстия успевают пройти 47 куб. сантиметров водорода в то время, когда пройдет лишь 10 куб. сант. углекислого газа. Такая разность времен прохождения этих газов может повлечь за собою, при надлежащем расположении прибора, к резким и очевидным явлениям, показывающим существование самостоятельного движения газовых частиц. На рисунке 30а, здесь приложенном, изображен прибор, при помощи которого диффузия между водородным и углекислым газами ведет к образованию фонтана воды, явно пока-

зывающего сильное приращение давления в том сосуде, где был тяжелый газ, приращение давления, зависящее от вхождения массы частиц легкого водорода, быстро входящего в сосуд с углекислотою, если оба газа разделены простою стенкою. Прибор расположен так, чтобы можно было иметь внутри углекислый газ, снаружи водород, а между ними простую стенку. Для этой последней берется один из тех глиняных (неглазированных, скважистых, пористых) цилиндрических сосудов, какие употребляются для составления элементов гальванических батарей. Дном кверху, отверстием книзу, такой глиняный цилиндр A закрепляется над воронкой B при помощи слоя смоляной замазки или мастики.[1] Горло воронки B скрепляется каучуковою трубкою D со стеклянной трубкой E, проходящей чрез трубку сосуда F. Этот сосуд вмещает воду (для видимости опыта, эту воду обыкновенно подкрашивают) и плотно заперт пробками, чрез которые, кроме трубки E, проходит еще другая трубка G, доходящая до дна сосуда и оканчивающаяся вверху тонким отверстием. Чрез эту-то трубку вода сосуда F и выбрасывается фонтаном, если в цилиндре A или в трубке E давление газа возрастет, а это случится, если в пористом сосуде A внутри будет тяжелый углекислый газ, а снаружи легкий водородный газ, потому что чрез поры цилиндра в данное время успеет проскочить почти в пять раз больше водорода, чем углекислоты. Поэтому следует сперва так сделать, чтобы внутри цилиндра A содержался углекислый газ, а не воздух. Для этого цилиндр A покрывается колоколом H, в который проводят чрез трубку I углекислый газ, приготовляемый в особом приборе, на рисунке, не изображенном.[2] Когда углекислый газ будет окружать цилиндр A, вмещающий воздух, тогда выходить чрез поры цилиндра будет больше воздуха, чем в то же время успеет взойти углекислоты (потому что она тяжелее воздуха), а потому в воронке и трубке E давление будет понижаться, а чрез трубку G будет входить воздух и давить на воду сосуда F, и в трубке E уровень воды поднимется. Но это поднятие, зависящее от разности давлений внутри и вне цилиндра A, будет невелико, потому что углекислый газ только в $1^1/_2$ раза плотнее воздуха, а следовательно его частицы движутся только немногим тише, чем воздушные. Когда из A выйдет чрез поры много воздуха и вскочит много углекислоты, тогда состав газа по обе стороны стенок пористого сосуда сравняется — по обе стороны будет смесь углекислоты с воздухом — тогда давление газа внутри и вне будет то же и это можно заметить, потому что уровень жидкости в трубке E опустится до уровня ее в F. Тогда внутри A будет много углекислоты. В это время, без замедления, в колокол H, окружающий A,

---

[1] Для скрепления стенки с металлом, деревом, глиною и т. п., очень пригодна легкоплавкая мастика, составляемая чрез сплавление 100 частей канифоли и 25 частей воска и чрез прибавку к сплавленной массе 40 частей (все по весу) прокаленной мумии или той красной краски, которою красятся кровли. В моем сочинении об «Упругости газов Т. I» желающие найдут подробности, касающиеся применения мастики.

[2] Как готовят углекислый и водородный газы, как их проводить и т. п., будет объяснено в дальнейшем изложении в этой книге, см. гл. 5 и 16.

проводят струю водородного газа чрез трубку K, прекращая приток углекислоты. Водород вытеснит из колокола углекислоту и будет теперь окружать стенки сосуда A, а потому водород будет быстрее входить в A, чем углекислый газ выходить из A, и в этом последнем давление возрастет от быстрого притока водорода, и фонтан воды из трубки G начнет бить. Это будет длиться до тех пор, пока вне и внутри A состав газа будет различен. Так как всякий понимает, что для образования фонтана нужна особая сила, некоторый род движения, то в описанном опыте становится очевидным, что в газовых частицах есть присущая им живая сила поступательного движения, могущая преобразоваться в иные роды движения. А так как непосредственно нашими органами чувств не замечается никакого движения в покойном газе, то и очевидно, что доказательство этого прямо невидимого движения есть открытие, подобное тому, как умственной работой над рядом известных соображений было открыто невидимое непосредственно движение земли около своей оси и вокруг солнца. Всего лет 20, много 30, в наше время стало очевидным существование поступательного движения в частицах газов. Кронig, Томсон, Клаузиус и многие содействовали развитию этого учения о газах, а англичанин Максвель облек предположение о самостоятельном движении газовых частиц в полную и совершенную теоретическую форму, пользуясь расчетами, основанными на теории вероятностей и определяя число столкновений, могущих случиться между частицами, движущимися во все стороны. Многие следствия этого расчета оказались на опыте совершенно отвечающими действительности, а потому современную теорию газов вместе с теориею тепла должно считать одним из важнейших научных завоеваний нашего столетия. Здесь неуместно излагать эти предметы физики и механики, но нельзя не заметить, что в наше время несомненным стало существование движения — мелкого и незаметного, но общего и сильного — всюду, во всем том, что считалось всегда и кажется на первый взгляд совершенно неподвижно косным, мертвым и лишенным даже какой бы то ни было внутренней силы. Узнав о существовании движения внутри всякого тела, увидев возможность превратить этот род движения во всякий другой род движения, люди должны убедиться в том, как еще громадно велика область познаний в среде невидимой, прямо органами не ощущаемой и, следовательно, как узко и ограниченно может быть суждение, опирающееся лишь на то, что непосредственно воспринимается внешними органами чувств, и как много может раскрыть неведомых областей разум людей, углубляющийся в подробный разбор данных, получаемых органами.

Итак, основное свойство газов состоит в том, что их частицы снабжены живою силою и находятся в беспрерывном поступательном движении, которое становится очевидным в диффузии чрез тонкие отверстия.

Так как, при истечении из более или менее широких отверстий, давления быстро уравниваются, то времена истечений в этом случае не столь ясно связаны с плотностями газов, как при истечении чрез тонкие отверстия.

Глава IV

Растворимость

Стр. 103—104

Растворимость газов в воде существенно не отличается от растворимости твердых тел в воде, но так как явления, происходящие при этом, как бы противоположны, то существуют некоторые пункты различия. Газ, растворяясь в воде, переходит в жидкое состояние, то-есть частицы его сближаются, а потому тепло развивается; у твердого же тела при растворении сцепление уменьшается, частицы разъединяются и тепло поглощается, как это бывает при сплавлении твердых тел. Притом твердое тело весьма мало, а газ очень много изменяет свой объем от давления, а потому и растворимость газа находится в более явной зависимости от давления, сравнительно с растворимостью твердых тел. Эти основные различия, не изменяя существенных черт растворимости, определяют подробности, изменяющиеся притом с различием одного вещества от другого, например, при переходе от одного газа к другому.

Для того, чтобы ясно видеть на опыте (демонстрировать) растворимость газов в воде, должно взять газ, представляющий большой коэффициент растворимости, например, аммиачный и ввести его в колокол (или цилиндр, как на фиг. 31 или 34), сперва наполненный ртутью и стоящий в ртутной ванне. Если затем впустить в цилиндр воды, то ртуть будет подниматься, потому что вода растворяет аммиачный газ. Если столб поднимаемой ртути не велик и количество воды достаточно для растворения газа, то весь газ поглотится водой. [1] В подъеме ртути видно ясное и значительное сродство воды к аммиачному газу и становится очевидной сила, действующая при растворении.

Глава V

Водород. (Физические свойства водорода. Коэффициент расширения и упругость водорода)

Стр. 155—157



Рис. 39.

Отношение водорода к сдавливанию и нагреванию мы рассмотрим подробнее, чем для какого-либо другого газа, не только по той причине,

[1] Чтобы ввести в цилиндр воду, употребляют стеклянную пипетку, изображенную на фиг. 39-й. Загнутый нижний конец ея вставляют в воду и всасывают воздух из верхнего конца. Когда вода заполнит пипетку, верхний конец ее запирают пальцем, а нижний вводят в ртуть ванны так, чтобы загнутый конец был в отверстии цилиндра. Тогда, или от давления водяного столба (если ртуть стоит в колоколе не высоко), или от вдувания воздуха в пипетку, вода из нее будет выходить в цилиндр и поднимется по своей легкости на поверхность ртути. Для такого газа, как аммиак, можно демонстрировать растворимость, наполнив стклянку аммиаком, заткнув ее пробкой с трубкою и погрузив конец трубки в воду. Когда часть воды взойдет в стклянку (чтоб это случилось скоро, стклянку предварительно можно нагреть), вода будет бить внутри стклянки фонтаном.

что описание водорода предшествует в нашем изложении описанию всех других газов, но и потому еще, что у водорода, как легчайшего газа, есть в этом отношении такие особенности, каких нет у других газов. Так, например, все другие газы представляют при возрастании давления выше атмосферного бóльшую сжимаемость и бóльший коэффициент расширения, чем следует по законам Мариотта и Гей-Люссака, а водород, напротив того, тогда менее сжимается, чем следует по закону Мариотта, и при повышении давления расширяется немного меньше, чем при атмосферном давлении. Это тем существеннее, что водород есть наилегчайший газ, а потому и самый характернейший, наиболее далекий от того плотного и сжатого (внутренними силами) состояния, в котором находятся обыкновенные твердые и жидкие тела.

Закон Гей-Люссака гласит, что все газы и во всех состояниях представляют один коэффициент расширения 0,00367, то-есть при нагревании от 0° до 100° расширяются, как воздух, а именно из тысячи объемов газа, измеренного при 0°, при 100° получается 1367 объемов. Реньо в 50-х годах показал, что закон Гей-Люссака не вполне точен и что разные газы, а также и один газ при разных давлениях, имеют не совершенно одинаковые коэффициенты расширения. Так, расширение от 0° до 100° для воздуха при обыкновенном давлении одной атмосферы = 0,367, а при 3-х атмосферах 0,371, для водорода 0,365, для углекислого газа 0,370. Впрочем Реньо определял не прямо изменение объема от 0° до 100°, а измерял изменение упругости при перемене температуры, а так как газы не вполне следуют Мариоттову закону, то по изменению упругости нельзя прямо судить об изменении объема. Исследования же, сделанные мною и Каяндером в 70-х годах, прямо показывают перемену объема при нагревании от 0° до 100°. Эти исследования подтвердили вывод Реньо относительно не полной точности закона Гей-Люссака и показали, сверх того: 1) что расширение на 1 объем от 0° до 100° при давлении одной атмосферы равно для воздуха 0,368, для водорода 0,367, для углекислого газа 0,373, для бромистого водорода 0,386 и т. д.; 2) что для газов, более сжимаемых, чем следует по Мариоттову закону, с возрастанием давления расширение от нагревания растет, например, при $3^1/_2$ атмосферного давления для воздуха оно равно 0,371, для углекислого газа при 1 атмосфере 0,373, при 3 атмосферах 0,389, при 8 атмосферах 0,413; 3) что для газов, менее сжимаемых, чем следует по закону Мариотта, напротив того, с возрастанием давления расширение объема от теплоты уменьшается, например, для водорода при 1 атмосфере 0,367, при 8 атмосферах 0,366, для воздуха при $^1/_4$ атмосферы давления 0,370, при 1 атмосферного давления 0,368, а водород, равно как и *воздух* (как и все газы), *при малых давлениях* именно и сжимается менее, чем следует по закону Мариотта (при бóльших, чем атмосферное давление воздух наоборот), как показали исследования мои с Кирпичевым и Гемилианом. Таким образом, водород, начиная от нулевого давления до самых высших давлений представляет постепенно, хотя и очень мало, уменьшающийся коэффициент расширения, тогда как для воздуха и других газов, при атмосферном давлении и высших давлениях, коэффициент расширения увеличивается по мере возрастания давления.

Эти отношения к закону Гей-Люссака, выделяющие водород из всех газов, как уже видно отчасти из предыдущего, повторяются в форме еще более очевидной по отношению к отступлениям от закона Мариотта, который выражает свойства, так называемого, совершенного газа, в природе не существующего. Закон этот требует, чтобы произведение из объема v на давление p для данной массы газа было величиною постоянною: $pv = k$, то-есть, не меняющеюся с переменою давления. В действительности это уравнение близко, но не точно, выражает наблюдаемое отношение объема к давлению. Величина pv оказывается зависящей от давления и с возрастанием давления величина pv или растет, или уменьшается. В первом случае сжимаемость меньше, чем по закону Мариотта, во втором больше. Первый случай мы будем называть положительным отступлением (потому что тогда производная $\frac{d(pv)}{dp} > 0$), второй отрицательным (потому что тогда производная отрицательная, меньше нуля). Измерения, сделанные мною с Кирпичевым и Гемилианом, показали, что все исследованные газы при малых давлениях, то-есть при значительном разрежении, представляют положительные отступления. С другой стороны, из исследований Наттерера оказывается, что все газы при больших давлениях, так сильно сжатые (в объем от 100 до 1000 раз меньший, чем под атмосферным да-

влением), представляют также положительные отступления.[1] Следовательно — этот род отступлений, так сказать, нормальный для газов. Оно и понятно. Если какой либо газ следовал закону Мариотта или бы сжимался еще больше, то при значительных давлениях он достигал бы плотности большей, чем у твердых и жидких тел, что́ невероятно само по себе и невозможно уже потому, что твердые и жидкие тела сами мало сжимаемы. Так, например, куб. сантиметр кислорода весит при 0° и атмосферном давлении около 0,0014 гр., а при давлении в 3000 атмосфер (в пушках можно достичь такого давления) он весил бы 4,2 гр., то-есть, был бы в четыре раза тяжелее воды, если бы последовал Мариоттову закону; при давлении в 10000 атмосфер он был бы тяжелее ртути. Кроме того, положительные отступления вероятны и в том смысле, что самим частицам газа надо приписать свой объем. Допустив, что закону Мариотта подчиняется только междучастичное пространство, получим необходимость положительных отступлений. Пусть, например, при одной атмосфере масса газа представляет объем, составленный из объема v_1 частиц и из объема V междучастичного пространства. Тогда при давлении в p атмосфер объем будет $\frac{V}{p} + v_1$, следовательно, произведение vp при одной атмосфере будет $V + v_1$, а при p атмосферах к $V + v_1 p$, то-есть будет больше, чем при одной атмосфере.

Итак нормальным законом сжимаемости газов должно считать возрастание pv с возрастанием давления. Водород при *всех давлениях* и представляет такую положительную сжимаемость, потому что он и при давлениях высших, чем атмосферное, представляет, по исследованиям Реньо, положительные отступления от закона Мариотта. Следовательно, водород есть газ, так сказать, образцовый. Ни один другой газ не относится столь просто к перемене давлений. Все другие газы, при давлениях от одной до 30 атмосфер, представляют отрицательные отступления, то-есть тогда сжимаются больше, чем следует по закону Мариотта, как показали изменения Реньо, оправдавшиеся при повторении их мною и Богузским. Так, например, при перемене давления от 4-х до 20 метров ртутного столба, то-есть при увеличении в 5 раз, объем уменьшался только в 4,93 раза, когда был взят водород, и для воздуха, в 5,06 раз.

---

[1] Например, при давлении в 2700 атмосфер воздух сжимается только в 800 раз, водород в 1000 раз.

ОБ ОПЫТАХ НАД УПРУГОСТЬЮ ГАЗОВ

Сообщение Д. И. Менделеева
в Императорском Русском Техническом Обществе
21-го января 1881 года

С.-Петербург
Типография брат. Пантелеевых, Казанская ул., д. № 33
1881

Печатано по распоряжению Императорского Русского
Технического Общества

Мне хотелось сообщить Вам, Мм. Гг., историю и результаты тех исследований над упругостью газов, которые получили название Опытов Имп. Русского Технического Общества и которые были поручены мне: как они возникли, как они велись и к чему они до сих пор привели.

Это было в 1871 году, когда, покончив часть своих прежних работ, я занимался расчетом данных Румфорда, Реньо и Наттерера над сжимаемостью газов и теоретическим обсуждением этого вопроса. Из того соображения, что сжатие газов не может идти беспредельно — по закону Бойль-Мариотта — иначе сжатый газ мог бы быть плотнее всякого твердого или жидкого тела, следует, что все газы должны сжиматься меньше, чем следует по закону, по крайней мере при некотором большом давлении, а следовательно, они сжимаются иначе, чем, например, по Реньо — воздух, для них должна быть перемена знака сжимаемости. В добытых уже данных нашлось при этом до тех пор неизвестное, сколько я знаю, оправдание этого вывода, а именно: действительность показывает для всех газов, в жидкость не перешедших, однообразную сжимаемость, при достижении газом некоторого давления; а потому при большом давлении, которое превышает те давления, при которых работал Реньо, даже газы, иначе отступающие от Бойль-Мариоттова закона, приобретают свойство менее сжиматься, чем следует по этому закону, когда давление превзойдет известную меру. Напомню, что известно было раньше, что нет ни одного газа, который бы точно следовал закону Бойль-Мариотта — у всех газов имеются отступления.

Исследования Реньо показали, что бывают для разных газов отступления не одинакового рода: одни я назову положительными, другие — отрицательными отступлениями. Положительные отступления такие, когда произведение из объема на давление при возрастании давления увеличивается. Отрицательные отступления будут такие, при которых, с возрастанием давления, это произведение уменьшается.

Для большинства газов отступления у Реньо получены отрицательные; только один водород показал ему положительное отступление, то-есть сжимался менее, чем следует по закону. Наттереровские исследования, произведенные над несколькими газами, при значительных давлениях, начиная от сотен до тысяч атмосфер, показали, что для всех газов, которые он исследовал, отступления существуют положительные, а потому, очевидно, надо было заключить, что между этими давлениями и давлением от одной до тридцати атмосфер, как в работах Реньо, для воздуха и т. п. газов, дающих отрицательные отступления, должна быть перемена знака сжимаемости с плюса на минус. Это, до тех пор

неизвестное обстоятельство, заинтересовало меня по его спекулятивному значению, как интересуют меня многие подобные вопросы, касающиеся свойства тел. Вообще говоря, научные спекуляции меня занимают, плодотворность некоторых из них мне очевидна вполне и если иные относятся презрительно к научным спекуляциям, то это происходит от того чаще всего, что забывается тождество или большая близость этого термина с более точным и общим, а именно с названием научной философии.

Спекулируя о газах, о тех давлениях, при которых знак отступлений меняется (т. е. газ следует закону Бойль-Мариотта), я вовсе не помышлял о возможности начать сложные и долгие опыты, сюда относящиеся, хотя и обсуждал такого рода меры и приемы, при помощи которых можно было бы решиться когда-нибудь заняться исследованием этого рода, то-есть разыскать такие необычные и до тех пор никем не предполагавшиеся давления, при которых газы меняют знак отступления или следуют закону Мариотта, подчинение которому все думали видеть в двух условиях: в газах при малом давлении и в газах, значительно нагретых.

В то самое время, когда я занимался расчетами, относящимися к упомянутому предмету, наш почтенный председатель, Петр Аркадьевич, заехал ко мне, и, узнавши от меня предмет моих занятий, захотел увидеть в нем интерес такой, который согласен с интересами Технического Общества. Он взял на себя труд и хлопоты достать средства, нужные для соответственных опытов. Ему угодно было, и я на это не только согласился, но этому и был очень рад, — поручить все дело опытов Комиссии, составленной из членов Технического Общества. В этой Комиссии находятся имена, всем известные: А. В. Гадолина, двух Кирпичевых, Михаила Львовича и Виктора Львовича, Н. П. Петрова, Ф. Ф. Петрушевского и А. П. Семечкина. Затем в Комиссию был приглашен еще известный механик Г. К. Брауер.

Комиссия, приступив к делу, нашла предлагавшиеся мною приемы подходящими и поручила мне непосредственное ближайшее ведение опытов. Другие члены Комиссии взяли на себя разработку отдельных частей, и я должен признать, что труды Михаила Львовича Кирпичева, — к сожалению, покойника теперь, — были очень важным вкладом в это дело, хотя он и не тотчас приступил к совместным со мною работам, а сперва, по поручению, данному ему, уехал на полгода на Урал. Как бы ни заинтересовался кто-либо предметом, подобным возложенному на меня, однако, силы одного человека здесь ничто—одному в подобных работах нельзя и думать о выполнении предполагавшегося. Ни одной минуты я не думал иначе и по этой только причине понимал надобность составления Комиссии, принадлежность опытов — целому Обществу. Что так это с самого начала понималось мною, как понимаю я это и теперь, когда прошло 8—9 лет, тому доказательство имеется в моей статье, помещенной тогда в Артиллерийском журнале (№ 8 за 1872 г.), где изложено содержание моих соображений и проект приборов, относящихся до опытов. Перечислив в этой статье г. г. членов Комиссии, я писал: «содействие этих лиц, принявших на себя изучение

некоторых отдельных вопросов, дает уверенность в достижении желанных результатов». На свои одни силы я не мог рассчитывать. В действительности сотрудничество М. Л. Кирпичева в 1873 и 1874 гг. было весьма драгоценно как в ходе многих предварительных работ, так и в производстве первых исследований. Вполне убежден, что если бы М. Л. продолжал жить и вместе действовать, мы успели бы с ним сделать гораздо больше, чем было сделано впоследствии, потому что, входя в такого рода опыты, мало им посвятить часы, недели, — нужны целые годы и все силы, что и делал М. Л. Кирпичев.

Излагаю первоначально лишь внешнюю судьбу или обстановку дела по отношению к лицам, ведшим его, потому что все ведение опытов, по самому ходу его, стало делом, хотя мне порученным, но в сущности делом Технического Общества, как видно в самом названии: Опыты Императорского Технического Общества. Я не более как докладчик этого дела и случайный свободный его исполнитель.

В то время, когда начинались опыты, было установлено, что они будут производиться в имеющемся свободном помещении при лаборатории С.-Петербургского Университета. Там они и производились. В дело ведения опытов, вместе со мною, с самого начала вошли некоторые из посторонних лиц, например В. Ф. Лучинин, Г. А. Шмидт и часть моих учеников: А. И. Еленев, Н. Ф. Иорданский, Е. К. Гутковская; часть дела приняли на себя Н. П. Петров и В. Л. Кирпичев. Все мое время в 1872 и 1874 годах было вполне отдано этому делу. Некоторые, свободно вошедшие в дело лица из числа работавших, могли посвятить опытам не много времени, входили в дело и должны были скоро оставлять его. Оттого дело шло, особенно вначале, когда было нужно выполнять много предварительных работ — очень медленно. Дело пошло скорее, когда к нему приступил со всей своей энергией М. Л. Кирпичев, когда нас стало двое, вполне отдавшихся начатому исследованию над газами под малыми давлениями. Только тем, кто не работал над точными физическими исследованиями и измерениями, да еще в Петербурге, может показаться удивительным и непонятным, как мало можно сделать в новой области в целые три года, в которые выполнено то, что описано в изданном первом томе отчетов об опытах. Не в оправдание себя, а в объяснение хода дела, скажу: пускай попробует из других кто-нибудь — сделать больше, я поклонюсь в пояс. В подобного рода работах, как начатые Обществом, скоро ничего сделать нельзя, а нам пришлось с самого начала все делать, начиная с калибрации термометров, с приготовления барометров, с компарации гирь и шкал, и, не будь содействия, которым я пользовался от названных лиц, самому одному не пришлось бы сделать и многого из того, что описано в 1-м томе и было готово к тому времени, как он явился в свет (1875 г.). Но случилось дальше во внешней обстановке дела чрезвычайно печальное обстоятельство: Михаил Львович Кирпичев в 1875 году скончался. Потери его я не могу вспомнить спокойно и по-ныне, и всегда так будет, потому что такого товарища в работе, как он, — я со многими работал, — трудно сыскать. Очутившись опять один, со многими начатыми частями работы, ни с одной частью

оконченною, с истраченными на приборы первыми 12-ю тысячами рублей, с необходимостью дать отчет об сделанном, с массою других, этому делу посторонних обязанностей, я стал действовать иначе.

Прежде всего необходимо было заручиться сотрудниками, так как вести дело одному совершенно нельзя, а в особенности впоследствии при опытах над давлениями уже бо́льшими, чем было вначале, а к этому было уже за то время многое заготовлено. Другого такого, отдавшегося делу человека, как М. Л. Кирпичев, на лицо не было, но были между молодыми людьми такие, которые хотели бы и могли трудиться над делом точных физических работ, но не имели возможности по совершенному недостатку других источников, обеспечивающих жизнь и оставляющих время для научного труда. Тогда я стал требовать хоть некоторых средств для приглашения помощников в работе. Благодаря опять-таки ходатайству Петра Аркадьевича, эти средства на приглашение помощников были даны. Было отпущено по 2 тысячи в год на вознаграждение сотрудников и на наем служителей, необходимых при работах.

У меня и были в 1875, 1876 и в первой половине 1877 года — два или три молодых товарища работы, которым сперва надо было просто привыкать и учиться делу. Они получали по 40—50 руб. в месяц. Это не обеспечивало жизни, но в дело пошли люди, которые были преданы научному интересу и довольствовались скромною, студенческою обстановкою. Вы знаете, конечно, что между молодыми людьми, работающими для науки, у нас мало людей, у которых было бы достаточно свободных средств и времени, и чтобы на таких можно было рассчитывать при ведении продолжительных работ, требующих специальной подготовки. Между приглашенными сотрудниками был один, отличавшийся чрезвычайною даровитостью, деятельный и усидчивый, это г-н Гемильян. С ним я стал продолжать ту часть работы, которую вел вместе с М. Л. Кирпичевым. Эта часть работы уже в 1876 г. была совершенно окончена. О результатах я скажу потом, сперва докончу рассказ о внешней обстановке опытов. Года два, начиная с августа 1875 года, г-н Гемильян работал со мною. Но и тут представился следующий случай: открылась в Варшаве профессура по химии; В. А. Гемильян — химик, как труженник и как отличный чтец он человек исключительных талантов, это знал я близко, и такой случай, как профессура по предмету, которому он посвятил свою деятельность, — такой случай редкость — и я сам же содействовал, как мне ни тяжело было, тому, чтобы он занял открывшуюся вакансию. А он — в опытах характера чисто физического — только что взошел в силу, ведя работу, подготовился к дальнейшему делу. Но упустить случай такой, какой представлялся ему для дальнейшей его судьбы, — это значило испортить ему жизнь. Рад тому, что в действительности все, что слышу из Варшавы об В. А. Гемильяне, все оправдывает мое отличное о нем мнение. Так пришлось потерять и другого готового к делу сотрудника. Он деятелен и жив, слава Богу, но он далеко от опытов, а это был первый и важнейший сотрудник, после М. Л. Кирпичева. В то же время я приобрел другого товарища в работе. Еще бывши студентом, Н. Н. Каяндер начал рабо-

тать в моей лаборатории над вопросами физико-химическими, к которым относятся и работы с газами. Года два после того он участвовал в работах, он вел почти исключительно работу над расширением газов. В настоящее время он в Киеве в качестве лаборанта. Третий сотрудник, участвовавший в опытах, был. г. Богусский из Варшавы. По рекомендации тамошних профессоров, он был приглашен мной и, занявшись года полтора упругостью газов под давлением выше одной атмосферы, он потом уехал на родину обратно.

Когда в 1877 году гг. Гемильян, Каяндер и Богусский удалились от нашего дела, тогда я опять очутился один. К счастью, каждый закончил часть работ, но признаюсь, что ведение дела в этом виде мне тогда же показалось, если возможным, то весьма трудным, и я с 1878 г. не стал брать из Общества деньги для опытов, желал выждать случая иметь сотрудников более прочных. Кстати у меня самого, имеющего вообще немного свободного времени, а множество всяких обязанностей, дел общих и личных, к тому времени усложнились другие дела и у меня было еще меньше свободного времени, чем прежде, для работы, а подготовленные части работы требовали его вполне. Замечу, что в 1876 году здесь же, при Техническом Обществе, устроена была Комиссия по поводу нефтяного кризиса, я был приглашен туда и мне было поручено ехать в Америку. Занятия этого рода должны были отчасти отвлечь — нельзя же было принять в нем участие и не войти в него, тем больше, что я нефтяным делом интересовался и тогда, и теперь продолжаю глубоко интересоваться им. В 1877 году я еще заболел плевритом, и оказалось, что мне необходимо отдохнуть от чтений и работ, чтобы избавиться от остатков болезни. По этому поводу я просил и получил из университета отпуск, чтоб отправиться за границу.

В это время мне было сделано предложение от Морского Министерства, средства которого участвовали в суммах, отпущенных для опытов над упругостью газов. Это Министерство предложило мне средства для моей заграничной годовой поездки с тем, чтобы я изложил современное состояние воздухоплавания. Оно интересовалось этим предметом по той причине, что в течение войны было представлено очень много разных проектов воздухоплавательной защиты и нападения. Морскому ведомству желательно было ориентироваться в этом предмете, и это возложено было на меня. Я сам этим вопросом интересовался и раньше, а потому охотно принял предложение. От этого произошло то, что второй том отчета об опытах, который я предполагал составить в бытность за границею (на расчет по массе опытов требовалось очень много времени),[1] в это время не мог быть сделан.

Взявшись за новую, мне порученную задачу, я отдался тогда ей и результатом занятий этого рода явился первый выпуск моего сочинения: «О сопротивлении жидкостей и воздухоплавании». Теперь я занят второй частью этого труда и у меня начаты опыты, сюда относящиеся.

Мне предложили, когда я лично в том нуждался, необходимые средства, я взял их и теперь еще нахожусь в долгу; потому что я только

[1] У Реньо расчетами занимался особый сотрудник г. Изарн (Izarn).

первым выпуском заплатил Морскому ведомству по отношению к задаче, возложенной на меня. Тут я в долгу, и сделанный мною личный долг заплатить считаю себя обязанным, а потому, если не весь вопрос воздухоплавания, то хоть одну его часть — о сопротивлении — обработаю по мере сил. Техническому же Обществу у меня нет долгов. Свободным я пришел, свободным ухожу.

Из членов Комиссии Технического Общества один М. Л. Кирпичев вошел ближе в судьбу опытов; он умер; бывшие затем помощники, так или иначе, оставили опыты; сам я должен был по встретившимся обстоятельствам жизни уехать на год за границу и сделать на этот предмет личное нравственное долговое обязательство. Поэтому с 1878 года я прекратил ведение опытов и оставил суммы на опыты и на помощников в Обществе, и, если теперь в моей лаборатории продолжается это дело, то оно идет лишь при содействии нашего Университетского лаборанта Ф. Я. Капустина. И так[1] я сам с 1878 г. не мог приняться за продолжение опытов, и так как разные мои попытки отыскать соответственных сотрудников были безуспешны, то я считаю ныне своим долгом, прямою своею обязанностью передать все дело продолжения опытов самому Техническому Обществу. Уверен, что оно найдет соответственных лиц, которым передаст то, что передано было мне, и что я по мере сил, знания и возможности старался выполнить в интересе научного существа дела. Не мало у нас есть лиц и между Гг. членами Общества, которые могут вести подобного рода опыты. И так имею честь передать при настоящем сообщении дальнейшее производство опытов Императорского Русского Технического Общества над упругостью газов — Вашему, Мм. Гг., общему вниманию.

Считаю при этом долгом заявить, что сложность моих прямых обязанностей, уменьшение с годами сил и здоровья, трудности, встреченные мною по отношению к необходимым сотрудникам работы и необходимость выполнить сделанный мною личный долг — вот те причины, которые принуждают меня отказаться от дела, начавшегося по моей же инициативе, но сделавшегося делом Императорского Русского Технического Общества.

Затем я считаю необходимым доложить Обществу о состоянии сумм, отпущенных на опыты. До сих пор на опыты было ассигновано 33 т. руб.[2] Из них 10 т. находятся ныне в кассе Общества.[3] Таким образом полная стоимость опытов, производившихся (с 1872 по 1878 год) 6 лет, представляет сумму 23 т. р. или средним числом ежегодно расходовалось на опыты, вместе с вознаграждением помощников, менее чем по четыре тысячи руб. Первое время помощники не получали вознаграждения, а в последние годы три сотрудника получали содержание, на которое, как это было предварительно предположено (вместе с содержанием служителей), приходилось около 2 т. р. в год. Всего расхода, который пошел на приобретение ценных приборов, было около

[1] [Повидимому, опечатка вместо «так как». *Прим. ред.*].

[2] По справке, полученной мною на днях от г. Секретаря Общества.

[3] Из них 8 т. руб. не взяты мною вовсе от Общества и 2 т. р. возвращены не взятых.

17 т. руб. Передавая г. Секретарю Общества последние счеты, я счел стоимость таких приборов, которые представляют и ныне полную свою стоимость и нашел ее равною 17 т. руб.

В наличности имеются многие редкие по точности приборы, например, катетометры, манометры, весы, гири горного хрусталя, насосы и т. п. Многие приборы получили гораздо большую ценность, чем была их начальная материальная стоимость, например метры и гири, стоившие десятки рублей, но по сличении их мною с парижскими нормами, стоят по крайней мере сотни рублей, барометры изготовлялись нами самими и т. п. Многие из этих приборов, назначенных для передачи в музей Общества, как определила Комиссия опытов,[1] могут быть проданы, если новое лицо, заведывающее опытами, найдет нужным заменить их другими. Счеты расходов на первые 15 т. рублей, израсходованных до марта 1875 г., даны мною в предисловии к первому тому отчетов (Об упругости газов I стр. XV [= 231]), а счеты на остальные 8 т. рублей, израсходованных в 1875—1878 г., переданные мною г. Секретарю Общества, представляют ценность около 4 т. р., на помощников и служителей, около 2 т. р. механику Брауеру за весы и разные др. приборы, остальные же 2 т. р. механику Новикову, столяру Францу, жестянику Видилону, за килограмм горного хрусталя, за хронометр и проч.

Таким образом в Обществе для продолжения опытов имеется в наличности 10.000 руб. и много приборов, представляющих ценность около 17 т. р. Всякие мелкие расходы и плата сотрудников выражается суммою около 6 т. руб., что составит в среднем по тысяче руб. в год. Сумма эта истрачена, барыш от нее надо искать в том, что сделано и чего достигнуто.

Прежде всего имеется уже выпущенный в 1875 году первый том Отчетов,[2] о котором мне, как его автору, нечего говорить. Затем имеются результаты опытов, долженствующие войти во 2-й том Отчета. Большинство их уже изложено вкратце в научных журналах и о том сообщено Обществу, но я постараюсь теперь резюмировать совокупность достигнутых результатов.

То, что предполагалось сделать, то, что составляет объект исследования, давно изложено мною печатно (Артилл. Журнал 1872 г. [= 128—171]; глава 1-я первого тома сочинения об упругости газов) и нет нужды повторять это. Мне кажется однако полезным одной чертою охарактеризовать предполагавшееся, чтоб выразить объект исследования с ясностью. Задачу опытов составляло продолжение, доделывание того, что не сделано было до тех пор, в особенности в знаменитых трудах

[1] Мое мнение при самом начале опытов состояло в том, чтобы приборы остались в Лаборатории Университета, где производятся мною опыты, так как здесь они могут принести и со временем свою наибольшую пользу, но я ныне рад ,что не произойдет, при передаче мною опытов в руки Общества, затруднения, которое могло бы родиться, если бы мое предложение было принято.

[2] На его отпечатание отпущено мне 2 т. рублей, израсходовано (на типографию, литографию, бумагу, рисовальщикам и т. п., как видно по счетам и как значится в предисловии (стр. XIV [= 231]), 2.460 р. От продажи экземпляров выручено по сих пор 350 р. Роздано и разослано более 180 экземпляров.

Реньо. На это, как увидим тотчас, главным образом было направлено все внимание, все труды мои и вышеупомянутых лиц. Не умолчу, однако, о следующем обстоятельстве, легко являвшемся в уме лиц, следивших за опытами, начиная от их возрождения, а именно: когда проектировались опыты, говорилось много о тех способах и о тех приборах, при помощи которых можно было бы произвести исследования над сжимаемостью газов под большими давлениями. А в этом отношении до сих пор ничего не сделано, ничего не публиковано, нет еще результатов. Ответ на этот пункт следующий. Не только говорилось об опытах при высоких давлениях, но и все для этого готовилось с первого же, можно сказать, дня, с первого приступа к делу, все туда было направлено; манометр готов, ему соответствующие сгустители и сосуды, могущие вмещать сжатые газы для взвешивания, также готовы с первых лет опытов; проф. Н. П. Петров установил особый, им проектированный насос для этой же цели; только те весы, которые назначались для взвешиваний, выполнены поздно, лишь в 1877 году, хотя условлены были в 1873 году, и с ними г-м Казанским выполнены предварительные работы, показавшие степень доверия к результатам взвешивания (около десятой миллиграмма при 1000 кгр. груза, если все сложные условия точности соблюдены) — одним словом много расходов пошло именно сюда и приготовлено почти все. Вместе с Г. А. Шмидтом, г. Пратцем и М. Л. Кирпичевым мы много хлопотали над манометром, но тут-то я увидел яснее всю неизбежную необходимость иметь постоянных и нескольких помощников, потому что прибор сложен и вышеуказанное отсутствие постоянных сотрудников, свободных от других дел, есть первая и основная причина того, почему до сих пор с давноустроенным манометром еще не сделано опытов. Есть другое обстоятельство, которое помогло тому, что опыты над газами под высокими давлениями были отложены, хотя подготовлены. Уже в то время, когда проектировались опыты Технического Общества, столь известный теперь г. Кайльте производил раньше свои опыты над сжимаемостью газов под большими давлениями. Методы, которые он употреблял для своих первых исследований, не удовлетворяли критике, но я узнал, что г. Кайльте предпринял новый ряд опытов. Бывши во Франции, познакомившись лично с г. Кайльте и видевши методы его исследования, теперь им примененные, я вывел заключение, что лучше подождать его результата. Ныне стало уже известно, что он немногого достиг, что найденное им по опыту есть как раз то, что выведено мною раньше путем спекулятивным, а именно он оправдал существование перемены знака отступлений в сжимаемости обычных газов при некотором давлении многих атмосфер. Надо заметить еще, что другие начатые работы оказались сложными, заняли все время у всех нас и начатое надо было прежде всего закончить, а начатое выбрано не случайно, как скажу далее. Сверх всего этого, и может быть, важнее всего заметить, что прежде чем приступить к опытам над сжимаемостью газов под большими давлениями, мне казалось вполне необходимым убедиться опытным путем в той роли, какую имеет поверхностное сгущение газов на стенках приборов в результатах изменения газовых

объемов и в мере отступления от Мариоттова закона, потому что при существовании поверхностного сгущения, должно ждать отрицательных отступлений.

Не вдаваясь в подробности методов и приборов Реньо, скажу, что он употреблял для своих опытов над сжимаемостью газов сравнительно тонкие, длинные трубки, в которых сообразно массе вмещаемого газа количество поверхностей, могущих сгущать газ, было велико, а потому влияние поверхности у него было велико и было желательно, даже необходимо, убедиться в том, что отрицательные отступления Реньо не зависят от этой причины. Поэтому я решил прежде всего повторить опыты Реньо над сжимаемостью воздуха и т. п. газов при давлениях более атмосферного и при таких условиях, чтобы количество поверхностей на данную массу газа было малое. Для этой цели г. Богусский, поступивши в сотрудничество, в течение полуторых годов определял сжимаемость нескольких газов под давлением от одной до 6 атмосфер, производя опыты в большом сосуде, представляющем относительно массы газа гораздо меньшую сгущающую поверхность, чем в исследовании Реньо.

Для того, чтобы большой стеклянный сосуд от перевеса внутреннего давления не лопнул, для этого он был окружен другим сосудом, в котором снаружи производилось такое же самое давление, которому подвергались газы, находящиеся во внутреннем сосуде. Опыты были обставлены так, что другие влияния (особенно же в изменении температуры шкалы и столбов ртути) наименее нарушали точность результата, а потому прибор вышел сложный (он изображен на XVI-ой таблице, из числа давно уже готовых ко 2-му тому отчетов). Пришлось для этого и шкалу, и манометрические трубки со ртутью и самый сосуд с газом, все это погрузить в одну общую ванну. Сложность прибора была неизбежна, а она и сделала ведение опытов продолжительным, потому что неоднократно пришлось переделывать весь прибор. Все это мы делали, конечно, сами, потому что в руках механиков стоимость подобных приборов была бы чрезвычайна. Мелочные подробности составляют действительное содержание подобных работ; иной прибор собирается в течение нескольких недель, а опыт с ним иногда длится всего несколько часов. Утомлять теперь ваше внимание этими подробностями невозможно и бесполезно, а кому их захочется узнать, тот найдет их в подробном отчете об опытах. Результаты этой части работ были сообщены на V съезде русских естествоиспытателей, бывшем в Варшаве в заседании 3 сентября 1876 г. [=636 –637]. В общих чертах результаты Реньо для воздуха, водорода и углекислоты под давлением выше одной атмосферы нашими наблюдениями подтверждены, и хотя числа вышли немного иные, но знак отступлений оказался такой же, и этим доказано, что причину отрицательных отступлений нельзя искать в поверхностном сгущении газов, она лежит в их основных свойствах.

Но не здесь был центр тяжести нашей работы. С той минуты, когда Кайльте подтвердил мой вывод о существовании для воздуха и т. п. газов большого давления, при котором знак отступления меняется,

в изучении больших давлений было менее теоретического интереса, чем во многих других частях вопроса об упругости газов.

Существуют именно такие стороны вопроса, которые совсем не были тронуты опытами Реньо или которые он затронул лишь вскользь, потому ли, что не нашел точных методов для их исследования, или от того, что считал несвоевременным или излишним входить в опытное решение иных сторон вопроса об упругости, хотя в них лежит большой теоретический интерес в смысле понимания природы газов. Вот эти-то пробелы работ Реньо, с самого начала моих работ над упругостью газов, меня всего более и занимали, потому что здесь можно было встретить новое, неизвестное совершенно и плодотворное. Как не в те части Африки стремятся путешественники, которые посещались уже другими и известны, а силятся проникнуть туда, где не была еще ничья нога, так и меня больше всего привлекали те области сведений об упругости газов, которых никто еще не знал или знали их едва-едва. Неизвестных сторон много, но между ними надо было отыскать важнейшие и в то же время доступные. Изучение и инстинкт помогают в выборе подобного рода и он был сделан мною в самом начале всей работы.

Таких областей две, и наша работа с ними закончена вполне. Первая область есть исследование упругости газов под давлениями, меньшими, чем атмосферное. Вторая область есть определение истинного, то есть объемного коэффициента расширения газов при разных давлениях.

Первая область представляла чрезвычайный теоретический интерес по той причине, что разреженные газы выражают предельную форму материи. В уме исследователей рисовалось всегда понятие о разреженном газе, как о совершенном газе, то есть таком, который точно следует закону Бойль-Мариотта. Обыкновенно считали, что в такой форме у газов нет отступлений от Мариоттова закона, вследствие большого удаления частиц, происходящего при уменьшении давления.

Не я один так думал, это утверждали можно сказать все, и Реньо в том числе. Но работ в этой трудной области не было. А потому, приступая к исследованию отступлений от Мариоттова закона, мне хотелось прежде всего видеть то состояние газов, в котором они по ожиданию должны следовать в точности закону так называемых совершенных газов. Оттого-то с самого начала, приступив к опытам, я много времени отдал этому первому вопросу. Первые же опыты показали мне, что и при малых давлениях есть отступления, и при том неожиданные по знаку, а именно всегда положительные, и при том значительные. Я сам себе не верил, изменял методы, усовершенствовал приемы — результат был тот же. В это время со мной и начал работать М. Л. Кирпичев и я продолжал начатую работу с ним в 1873—1874 г. А потом, в 1875 и 1876 г., та же работа ведена и закончена мною с В. А. Гемильяном. Исследование оказалось более сложным, а оттого и более интересным, чем можно было ожидать сначала. Множество побочных практических сторон дела пришлось изучать с самого, так сказать,

их начала, например, способы измерения малых давлений. Надо было обладать таким бароманометром, в котором не было бы своего, самостоятельного, газового давления того газа, который находится в торичеллиевой или барометрической пустоте, — или знать его, как знаешь упругость ртутного пара. Не описывая подробностей, я скажу, что под конец мы дошли до того, что сколько угодно раз получали абсолютную пустоту в барометре. В этом можно было убедиться не только приемом Араго, но еще тем, что электрический разряд не проходит чрез такую барометрическую пустоту. Подробности отчасти уже описаны в I томе, а я остановлю ваше внимание на том, до чего мы дошли и какие получены нами результаты.

Чрез наши руки прошел десяток разных, всякий раз изменявшихся и совершенствовавшихся приборов, пока достигнуто было окончательное приспособление, удовлетворившее всем нашим требованиям. Прибор этот изображен на XV таблице II тома, уже напечатанной, но еще не явившейся в свет. Прибор этот имел следующее устройство: в одной общей ванне, закрытой стеклами, все погружено в воде: 1) сосуд, в котором находится газ, из которого выпускается ртуть, чем изменяется объем газа; 2) капиллярная трубка сообщает этот сосуд с бароманометром, который был особого устройства; 3) шкала; 4) мешалки; 5) дифференциальный термометр.

Мы не надеялись достигнуть абсолютной пустоты в барометре (но достигли), а потому бароманометр был составлен из двух барометров с общею пустотою вверху и с капиллярной трубкой, которой отливается ртуть сверху. Этот метод, до того времени как предложен был мною, не применялся для барометров. Он то и дал возможность, при соблюдении совокупности предосторожностей, достичь совершенной пустоты барометрической камеры. Воздушный дифференциальный термометр показывал разность температуры в разных уровнях ванны и указывал время, когда надо было перемешивать в ней воду.

Месяцы усидчивой работы В. А. Гемильяна были затрачены, прежде чем разные части были собраны и приведены в соответствие, то-есть пока можно было приступить к получению опытных результатов. Брали мы водород, воздух (или лучше азот), угольную кислоту и сернистую кислоту. Эти два последние газа были взяты тогда, когда оказалось, что при малых давлениях отступление воздуха и водорода одинаково положительное. Эти газы отвечают противоположным отступлениям, когда опыты производятся при давлениях выше атмосферного. Так как и с самого начала (1872 г.) мой первый прибор показал мне, когда я еще работал один, то же самое и то же повторялось при всех видоизменениях приборов, то — убеждение получилось полнейшее. Оказалось, значит, что при малых давлениях отступления от Мариоттова закона существуют всегда положительные. У сернистого газа и углекислого при обыкновенных давлениях отрицательные отступления велики, потому что эти газы близки к состоянию насыщенных паров или к переходу в жидкость, а потому они взяты были в работу, и оказалось, что для них есть такие малые давления, при которых и для них начинаются отступления положительные. Всем

этим показано до тех пор совершенно неизвестное и ни из чего не предвидевшееся изменение знака сжимаемости для газов, дающих отрицательные отступления, не только в области больших давлений, но и при малых давлениях, при которых все газы представляют положительные отступления от Бойль-Мариоттова закона. Если возьмем воздух, или другой ему подобный газ, который по исследованиям Реньо при 1 до 30 атмосфер представляет отступление отрицательное, а при малом давлении представляется с отступлением положительным, то для него окажется двукратная перемена знака отступлений: одна при значительном сжатии, другая при разрежении и в обоих крайних состояниях — отступления оказываются положительными, первые видны из Наттереровских, Румфордовских и т. п. опытов, вторые из опытов, нами сделанных, то-есть из опытов Императорского Русского Технического Общества. Из всех газов один только водород не представлял этой перемены знака отступлений, для него всегда отступления положительны и при том малы. Теперь очевидно, что в норме, в пределе, в приближении к совершенству — газы представляют положительные отступления, то есть сжимаются меньше, чем следует по закону Мариотта. Отрицательные отступления надо считать не нормою газа, а знаком приближения к жидкому состоянию и можно думать, что они усиливаются при температурах низших, когда газы близятся к своим температурам абсолютного кипения, что я предполагал еще в 1870 году (Анналы Поггендорфа, т. CXVI, стр. 618) по поводу наблюдений Эндрьюса и когда предвидел возможность сгущения водорода и др. не сгущавшихся газов в жидкость при помощи именно понижения температур (стр. 623), что ныне и оправдалось опытами Пикте и Кайльте. При работе, ныне совершенно законченной, над сжимаемостью под малыми давлениями, было не мало и неудач, отнявших много времени и неизбежных в новой области опытного исследования. Так неудачны были попытки заменить ртуть легкою, мало летучею, как ртуть, жидкостью, для того чтобы ею измерить самые малые давления. Кажется, что идея проста и легко выполнима тем более, что масляно-нефтяной манометр я сам применял во многих случаях. Сколько с этим мы ни бились — успеха не было, потому что нефтяное масло, при обыкновенной температуре и под самыми малыми давлениями, хотя бы было долго держано в пустоте и из него все, что может быть летучего, выкачано — дает из себя газ, не пар, а газ, который в этой нефти потом не растворяется. Полагаю, однако, что это имеет свой интерес в нефтяном вопросе. Быть может, что это объясняет образование из нефти болотного газа в природе, где он всегда сопровождает нефть. В недавнее время исследования профессора Густавсона дают этому неожиданное подтверждение, потому что при всякой температуре, при действии хлористого алюминия, нефть, оказалось, дает болотный газ.

Итак оказывается, что все газы, даже столь разнородные, как сернистый газ и водород, под давлениями очень малыми, когда их частицы далеко удалены друг от друга, представляют отступления положительные и под давлениями очень большими, при сближении

частиц, представляют отступления также положительные. Только в средине, при близких к обычному давлениях, как то было у Реньо, бывают различные отступления. Вот главный результат наших опытов. То, что относится в этом до малых давлений, есть то новое, что они внесли в науку, то, с чем придется затем теории газов так или иначе справиться. То обстоятельство, что при больших давлениях всегда получают положительные отступления — это можно легко понять, например, хотя бы предположивши, вместе с Ван-дер-Ваальсом, в частицах измеримые, хотя и малые, объемы, не изменяющиеся или мало изменяющиеся (как в телах твердых или жидких) при перемене давлений, то-есть предположивши, что самые частицы тел занимают определенное пространство. Допустив, что между-частичные пространства изменяются с переменою давлений по Мариоттову закону, а самые частицы остаются малоизменчивыми, поймем положительные отступления, наступающие при больших давлениях, когда частицы близки. Но отрицательные отступления и особенно общность положительных отступлений, наступающих при малых давлениях, составляют задачу теории, ещё ныне не разрешенную. Опыт здесь встал, как оно и должно быть, впереди толкования. Думаю, что общность явления при малых давлениях для всех газов приведет современем к пониманию свойств того состояния материи, которое вслед за Фарадеем хотят считать четвертым состоянием материи. Наши опыты показывают, что в этом состоянии газовая материя приобретает некоторые свойства твердых тел. Если мы станем сдавливать твердое тело или жидкость, то они будут сжиматься в гораздо меньшей мере, чем будет возрастать давление, и если давление увеличится во много раз, объем только немного изменится, то-есть тела этого рода представляют положительные отступления, по знаку одинаковые с газами в их предельных состояниях.

Кроме сжимаемости под малыми давлениями, наши исследования были направлены еще на определение истинного коэффициента объемного изменения газов от нагревания. Связь основных законов, управляющих газами и выражающих зависимость между химическою природою газа, его массою, объемом, давлением и температурою, может быть выражена одною общею формулою, которую я развил в 1-м томе Отчета об опытах и в Записках Парижской академии наук. [1] Связь эта заставляет думать, что существует также некоторая связь и между отступлениями от основных газовых законов. Так, например, несо-

[1] Comptes rendus 1876. Février [=621—630]. Здесь дана мною следующая формула для совершенного газа, более полная, чем формула Клайперона, отвечающая комбинации двух (Мариотта и Гей-Люссака) законов, потому что отвечает и третьему (Авогадро) закону газов: $apv = K(C + t)m$, где a есть вес химической частицы, приняв атом водорода за 1, p—давление на кв. метр в кило, v—объем в куб. метрах, m—вес газа в кило, t—температура по Цельзию, $C = \frac{1}{a}$ или, так называемая, абсолютная температура таяния льда, $K = 845 = (c—c')aE$, где c и c' две теплоёмкости газа, E механический эквивалент тепла. Выше приведенною формулою можно с удобством пользоваться при всяких расчетах, касающихся до всяких газов, потому что она приложима ко всякому газу и пару, мало удаленному от совершенства.

вершенство газов, по отношению к закону Бойль-Мариотта, можно связать с отступлением от закона Гей-Люссака, и так как вообще упругость массы газа меняется от объема и температуры, то естественно связаны между собою и работы над сжимаемостью от перемены температуры и от перемены давления. Реньо вел их параллельно, так шли они и в нашем исследовании. Но у Реньо расширение газов получено с большою полнотою только для того коэффициента расширения, который получается при постоянном объеме газа, то-есть, строго говоря, изучался не коэффициент расширения, а коэффициент изменения упругости от теплоты. А так как его величина определяется из наблюдения двух различных давлений, то в величине этого коэффициента включается отступление от закона Бойль-Мариотта. Только тот коэффициент расширения газов, который определяется при постоянном давлении, есть поэтому истинный, потому что показывает изменение объема с температурою. Вот его-то я и старался определить точнее, чем он был известен по первоначальным наблюдениям других физиков и по исследованиям Реньо. Определения истинного коэффициента расширения газов у Реньо, во-первых, очень малочисленны, а во-вторых, сделаны по методу, который он сам считал мало точным, потому что при температуре кипения воды около трети газа была вне ванны, что давало повод к погрешностям. Реньо даже считал почти невозможным изобретение точной и прямой методы для определения истинного коэффициента расширения газов, потому что представлял себе неизбежным иметь для этой цели весьма гибкий сосуд, в роде пузыря, с содержанием газа при 0° и 100° (Relations des expériences I p. 59). В действительности следующий простой прием дает прямо величину истинного коэффициента расширения газа. Возьмем яйцевидный сосуд с газом и поместим его в ванну. Верх сосуда сообщим с манометром, могущим с большою чувствительностью показывать малые перемены давления, около того давления, при котором желаем сделать определение коэффициента расширения. Не описываю устройства нашего манометра, потому что не в нем сущность дела и ему можно придать различное устройство. Нижняя часть яйцевидного сосуда пусть кончается капиллярною трубкою, выдается из ванны, снабдится краном и может наполняться ртутью. Узнаем сперва, в весе ртути, емкость той части сосуда, которая вмещена в ванну. Это будет начальный объем газа, если мы весь сосуд наполним газом и ртуть оставим в нижней трубочке до условной черты. Пусть это будет при температуре кипения воды. Стоит теперь охлаждать ванну до 0°, окружая сосуд льдом, — давление станет уменьшаться, что будет видно по манометру. Но не будем допускать до этого. Для этого станем чрез кран и нижнюю трубку вливать в наш сосуд ртуть в таком количестве, чтобы упругость газа в тающем льде осталась та же, что была в парах воды. Когда этого достигнем при наступлении 0°, тогда дадим принять прибору обыкновенную температуру и выльем до прежней условной метки всю ртуть, введенную при 0° в сосуд. Вес этой ртути вместе с весом ртути, наполняющей весь сосуд, при знании коэффициента расширения сосуда, дает все элементы, необходимые для определения

истинного коэффициента расширения газа. Очевидно, что при всяком давлении можно делать такие-же определения. Продолжались эти исследования, начавшиеся в 1874 году, до 1878 года, вел их преимущественно Н. Н. Каяндер, они закончены совершенно, о них сообщено, как и о других частях опытов, после выхода 1-го тома в нашем Физико-Химическом Обществе [=213—220 и 632] и в Парижской Академии [=633—635]; рисунок прибора дан еще в 1-м томе на таблице XII-ой, ко 2 тому отчета; главы, эту часть работы описывающие, почти готовы, остается однако перечислить еще позднейшие наблюдения над разными газами при разных давлениях. Результаты этой части работ были для меня чрезвычайно важны особенно потому, что неожиданно укрепили вновь вывод предшествующей нашей работы. Укажу теперь вкратце на выводы этой части работы. Известно, что по Реньо коэффициент расширения воздуха 0,003665, но, во первых, это есть коэффициент изменения давлений, а не объемов; во вторых, он отнесен к температуре 0—100°, определяемой в Париже, а для сравнимости вывода надо отнести к широте места в 45°, при которой давление в 760 мм. имеет определенное значение. Сделав эту поправку, сличив с поправленными данными Магнуса и Жоли, я нашел, что все они трое дают для коэффициента изменения упругости, совершенно одно и то же число, а именно 0,003670. Немногие опыты Реньо над истинным коэффициентом расширения воздуха (при постоянном давлении), дали ему это самое число. Но в нем были погрешности, и наши, много раз повторявшиеся определения, дали в среднем, со всеми поправками, истинный коэффициент расширения воздуха 0,0036829, [1] то-есть больший, чем оба числа Реньо. Поэтому, если воздух свободно расширяется при обыкновенном давлении, 10 000 его объемов, меренных при температуре тающего льда, займут 13 683 объемов при температуре кипения воды, если давление на кипящую воду было равно тому давлению, которое выражается ртутным столбом в 760 мм. высотою, при географической широте (или при напряжении тяжести) в 45°.

Когда метода была установлена и получилось убеждение в ее точности, исследования направлены были к тому, чтобы узнать изменение величины коэффициента расширения с переменою состава и давления.

Были определены коэффициенты расширения многих газов; наименьший был найден для водорода — легчайшего газа (0,00367) с наименьшим частичным весом; наибольший — для таких тяжелых газов, как бромистый водород (0,00386), и таких, легко сгущаемых, как сернистый газ (0,00385); а для таких газов, как окись углерода и азот, или углекислота (0,00373) и закись азота (0,00373), у которых вес химической частицы один и тот же (44), а следовательно и плотности те же, оказался один и тот же истинный коэффициент расширения, что показывает тесную связь этого данного с основною природою газа, весом его частицы определяемого. Но данные эти, повторю, еще не

[1] В 1875 г. (см. Журн. Хим. Общ. 1875 [=215—220] и Comptes rendus, 1876, LXXII—450 [=633—635]) дано мною и Каяндером, 0,0036843, но тогда было меньше данных и не введена поправка на широту места.

было времени окончательно пересчитать, а потому они еще не публикованы. То же относится и до изменения коэффициента расширения с давлением. В этом последнем отношении, однако, и при первом взгляде на результаты выступает та связь, какую имеет истинный коэффициент расширения газов с законами Мариотта. Коэффициент расширения, как и произведение из объема на давление, для совершенного газа признается постоянною величиною, для реальных же газов обе величины меняются с переменою давления. И надо заметить, что при обычных способах (то-есть при постоянном объеме) определения коэффициента расширения газов, отступления обоих рядов смешиваются, прикрывают друг друга, потому что при 0° давление газа при том же объеме иное, чем при 100°. Только при определении истинного коэффициента расширения, что и составляло предмет нашего исследования, может выразиться в ясности само по себе отступление от постоянства в расширении. Изменение истинного коэффициента расширения газов с переменою давления и замечено нами для всех исследованных газов. Реньо не заметил для водорода перемены расширения (определенного по способу постоянного объема) с переменою давления, а для истинного коэффициента расширения водорода существует *уменьшение* коэффициента с повышением давления. Так при давлении около 200 мм. ртути, для водорода истинный коэффициент расширения близок к 0,00369, при давлении в 1 атмосферу 0,00367, при давлении около 8 атмосфер 0,00366.

Мы выше видели, что у водорода отступления (от закона Мариотта) всегда положительные, и для него всегда (то-есть при всяком возрастании давления от 0), замечается *уменьшение* коэффициента расширения с повышением давления. Ни Реньо, ни одному другому наблюдателю это явление *уменьшения* коэффициента расширения с возрастанием давления, до сих пор известно не было. И дело, в сущности, конечно, после продолжительного ряда наблюдений оказалось крайне простым. Если отступления (от Мариоттова закона) положительны, истинный коэффициент расширения всегда *уменьшается*, если отступления отрицательны, истинный коэффициент расширения *увеличивается* с возрастанием давления. Так для воздуха и для давлений выше атмосферного коэффициент расширения *увеличивается*, отступления же отрицательны; а для давлений малых, когда отступления положительны и у воздуха истинный коэффициент расширения *уменьшается*, конечно, с ростом давления, так что для воздуха при давлениях, близких к одной атмосфере, коэффициент расширения достигает своей наименьшей величины 0,00368. При $3^1/_2$ атмосферах он 0,00371, при $^1/_4$ атмосферы около 0,00370. Для углекислого газа при давлении около 120 мм. 0,00372, при давлении около 220 мм. 0,00370, при 1 атмосфере давления 0,00373, при 3-х атм. 0,00389, при 8 атм. 0,00413. Здесь отступления, начиная от давления около 200 мм., отрицательны и велики и в то же время замечается *увеличение* коэффициента расширения — и большое, а для самых малых давлений отступления положительны и замечается *уменьшение* коэффициента расширения.

Следовательно: когда меняется знак отступления от закона Мариотта с + (плюса) на — (минус), тогда, то-есть при тех давлениях, отступления от закона Гей-Люссака меняют также свой знак, но с — (минуса) на + (плюс), а при месте перемены знака, очевидно, прилагаются и закон Мариотта, и закон Гей-Люссака. А так как мы выше видели, что отступления положительные для водорода, для всех газов при малых давлениях и для всех газов при больших давлениях существуют всегда, составляют норму газового состояния, то надо допустить в противность общепринятому, что нормальное явление для газа есть уменьшение истинного коэффициента расширения с повышением давления.

Приступив к работе, я искал в опыте именно того, что нашел спекулятивно, то-есть перемены в отступлениях. Не при больших давлениях, с которыми не пришлось сделать исследований, а при малых давлениях я их, эти самые искомые перемены в знаке отступлений, нашел и при этом моя уверенность в связи главных законов, газами управляющих (ст. Об упругости газов, часть I, стр. VII предисловия, Comptes rendus de l'Ac. des Sciences 1876 fev. [= 633—635]), оправдалась в такой области, где я совершенно того и не ожидал. Я счастлив, что успел закончить такую часть работы над упругостью газов, где нашлось не только много нового и неожиданного, но и оправдался интерес к продолжению работ Реньо.

Убежден, что и в других частях работы найдется не мало нового и теоретически важного для понимания газообразного состояния материи, но как я уже сказал, мне нельзя, по многим причинам, принять на себя продолжение опытов И. Р. Технического Общества, и я имею честь передать это дело в руки других членов Общества, из которых осмелюсь указать на г. Председателя комиссии и Академика Физики, Генерала А. В. Гадолина. Но когда поручите, Мм. Гг., это дело другому лицу, советую его не торопить. Дело точных научных определений медленно и без полной свободы действия итти не может. Реньо начал свои опыты в 1840 году, работал при содействии многих лиц, имел калькулятора, а все-же издал: 1-й том отчетов в 1847 г., 2-ой том 1862, третий том в 1870 г. Наши опыты начаты 1872 г. Первый том уже был издан в 1875 году. Мне, или другому из нас, не стать равняться с знаменитым французским исследователем, а потому позволяю себе сказать Вам, Мм. Гг., еще раз: кому бы вы ни поручили продолжение опытов, не требуйте от него скорого отчета и результата, не торопите его, не говорите ему часто: «Дайте отчет, пожалуйста, дайте отчет». Нет, оставьте ему свободу, — без нее научный успех не возможен, потому что наука есть дело вольное и деликатное. А теперь прошу Вас, Петр Аркадьевич и Вас, Милостивые Государи, принять мою благодарность за то доверие, которым Вы меня почтили, поручив мне первоначальное ведение опытов Императорского Русского Технического Общества. (Громкие рукоплескания).

Председатель: Мм. Гг.! Громкие рукоплескания Ваши доказывают мне, что предложение мое о выражении признательности Д. И. Менделееву за сделанное сообщение Вами одобрено вполне. (Громкие рукоплескания).

Затем я не могу оставить без внимания того заявления, которое Вам сделал почтенный профессор. Он объявил Вам, что не может продолжать опытов и предлагает Русскому Техническому Обществу обратиться к другим лицам, располагающим свободным временем, чтобы покончить начатые им опыты. Я полагаю, что Императорскому Русскому Техническому Обществу будет трудно на это согласиться и ему придется просить профессора Менделеева продолжать свои исследования. Если, к сожалению, профессор Менделеев и отвлекался от исполнения опытов над газами другими учеными трудами, тем не менее Русское Техническое Общество вполне сознавало, что опыты подобного рода требуют много времени, а потому мне, Председателю Общества, не пришлось ни разу сделать напоминаний профессору со стороны Общества об ускорении работы.

Хотя и существовала Комиссия, составленная Советом Общества по поводу опытов профессора Менделеева, но цель этой Комиссии была: 1) Обсудить, насколько опыты, предполагаемые Дмитрием Ивановичем, соответствуют цели, преследуемой Императорским Русским Техническим Обществом, на основании высочайше утвержденного устава; и 2) содействовать профессору Менделееву советами и действиями, насколько это он сам нашел бы нужным. Вот почему, как только профессор Менделеев выработал общий план для своих исследований, Комиссия, не получая отзывов о содействии со стороны Д. И., и не собиралась.

Многие подробности, относящиеся до опытов, известны только г-ну Менделееву, да кроме того им сделаны различного рода приспособления, обеспечивающие удобства исполнения опытов, в помещении Спб Университета; Императорское Русское Техническое Общество не имеет помещения, специально устроенного для опытов.

Может быть с отказом профессора Менделеева сделается нам невозможным производство опытов, польза которых была признана самим правительством. При исходатайствовании тех средств, которыми Д. И. располагал для опытов — была объяснена нами связь опытов над газами при больших давлениях с вопросами, интересующими Военное и Морское Ведомства.

При этом, кроме испрошенных мною сумм, я питал надежду, что субсидии будут продолжаться, если исследования Д. И. Менделеева над газами увенчаются успехом и доставят данные, необходимые для разрешения вопросов, интересующих военную технику. Императорскому Русскому Техническому Обществу придется продолжать начатое, если бы даже для опытов потребовалось бы гораздо более времени, нежели это было сперва предположено, и если бы пришлось испрашивать дополнительные субсидии от ведомств, обеспечивших их производство до этого времени.

Д. И. Менделеев: Позволю себе заметить, что ведь я мог умереть, мог выйти из университета, опыты, конечно, все-таки продолжались бы. Уже поработавши не мало, издавши в 1875 году первый том отчета, продолжавши труд до того, что часть его, как я имел честь выше изложить, совершенно закончена, заболевши, взойдя по обстоятельствам

жизни в обязательства иного рода, я не могу и не должен удерживать за собою то дело, которое делал по одному свободному интересу к работам подобного рода и потому, что комиссия, избранная для ведения дела, поручила его мне. С самого начала, особенно же с того момента, когда в комиссии был поставлен вопрос о мере моего участия в ведении опытов, я не считал начатые опыты своим личным делом, ни своею обязанностью, ни своим правом, а делом Императорского Русского Технического Общества. Указываю вам даже лицо, которому всего естественнее вручить теперь это дело. Это председатель нашей комиссии, наш известный сочлен, академик по физике А. В. Гадолин, вручите ему! Это лицо, — я вполне убежден, — лучше, успешнее меня исполнит дело и направит его к важнейшим задачам. Найдется, кроме того, конечно, между вами и много других, гораздо сильнейших меня, более свободных, сильных и опытных. Я не могу теперь ручаться даже за близкое будущее, — теперь я занят, теперь я утомлен, теперь, кроме того, я не найду помощников, хоть их ищу третий год. Будьте снисходительны ко мне, не налагайте того, что я один не в силах выполнить; обратите внимание на то, что не только Ваши, но и разные другие интересы науки и жизни и без того берут все мое время, рвут на части. Здесь я сделал, что мог и успел, здесь долгу за собой не слышу. Те, кто был около меня, понимают и видели сложность требуемого от меня. Всего мне не выполнить, что хотел бы; выбираю на остаток дней то, что в силах, то, что считаю в одно и то же время важным и возможным, да то, что составляет мой прямой долг, мою прямую обязанность и, поступая так, не разрываясь напрасно, думаю, что выполняю и тот долг, который каждый из нас имеет пред родиной — трудиться по мере сил. Для того же дела, которое я свободно принял на себя по поручению Общества и где я сделал, что мог, среди Вас найдутся, конечно, другие лица. Меня же увольте.

Председатель: Несмотря на доводы уважаемого профессора я убежден, что Императорское Русское Техническое Общество поручит мне просить его не отказываться от продолжения опытов, так как никому другому, кроме Д. И., не известны все обстоятельства, могущие влиять на успех этих опытов, — да при том и самые опыты по справедливости носят название Менделеевских, а не опытов Комиссии Императорского Русского Технического Общества.

Роль последней была мною уже прежде объяснена.

Весьма вероятно, что имя уважаемого профессора — помогло добыть и субсидии, а отказ его участвовать в опытах умалит их значение.

Д. И. Менделеев: Прошу обратить внимание, что Вам еще будет легче добыть дальнейшие субсидии, если они понадобятся, к тому десятку тысяч, которые остались от меня, когда Академик Физики Генерал Артиллерии А. В. Гадолин, Начальник Арсенала, будет во главе этого дела. Содействовать делу опытов советом и обсуждением я с большим удовольствием стану, если их от меня пожелают иметь, но принять все дело вновь на себя я не вижу никакой возможности по всем тем причинам, которые высказывал. При том научное дело во всяком случае может идти успешнее только при полной доброй воле,

а отнюдь не в ответ на просьбу даже от такого уважаемого лица, как Вы, Петр Аркадьевич. Всего же важнее здесь то обстоятельство, что дело опытов, мною до сих пор веденное, составляет не мое личное научное предприятие, а предприятие целого Общества, которому я готов был служить, пока имел возможность, силы и время, в виду того чисто научного интереса предприятия Общества и той готовности, с какою высшее правительство ассигновало средства для этого научного предприятия Общества. Теперь же больше нет у меня возможности, меньше и сил, мало и времени за многими другими делами, которые считаю, если не столь важными, то по крайней мере не менее настоятельными и обязательными. И эти дела — тоже не мои личные.

Председатель: Аксель Вильгельмович Гадолин, был назначен председателем Комиссии вследствие того, что субсидия от Министерства Военного была получена только благодаря его содействию; имя этого ученого служило гарантиею, что опыты, преследуемые по составленному Д. И. Менделеевым плану, доставят данные, полезные для Артиллерии. Без сомнения участие А. В. Гадолина в опытах желательно, но он, будучи Инспектором Арсеналов, расположенных в разных частях России, будучи Профессором в Артиллерийской Академии и Технологическом Институте, членом значительного числа Комиссий по Артиллерийскому ведомству, Гадолин не может, по крайней мере теперь, заняться этим вопросом.

Д. И. Менделеев: Ведь у меня, как у профессора Университета и члена разных комиссий, тоже не мало прямых обязанностей, и если А. В. Гадолину нет времени, найдется, вероятно, другое более свободное лицо, а меня во всяком случае увольте.

Г. Филипенко. Мы должны уважить просьбу профессора Менделеева.

Председатель: Я считаю, все-таки, что обязанность Совета Императорского Русского Технического Общества будет просить Д. И. не отказываться от продолжения опытов. Он может не работать лично, но по крайней мере руководить исполнителями, которых нужно будет приискать.

Затем, если никто не желает сделать дополнений к докладу Д. И. Менделеева, то я объявляю собрание закрытым.

Журнал Русского Физико-Химического Общества т. XV, 1883 г. вып. 1, стр. 60.

ВЫПИСКА

из протокола заседания отделения химии Р. Ф.-Хим. Об-ва

6-го января 1883 г.

Д. Менделеев описывает новый, испытанный прибор для определения плотностей пара. Трубочка с отвешенным (или измеренным по объему) количеством вещества вводится в верхнюю часть измерительной трубки, запирающуюся стеклянною пробкою и ртутью. Измерительная трубка соединена внизу или с барометром, или с манометром, или с деленною трубкою, содержащею известную массу водорода. В этом последнем случае избегается надобность отсчитывать термометр и барометр, относя плотности пара к водороду.

Основы Химии, 5-ое издание, 1889 г.
Главы I, II, III, VII, XIV.

ВЫПИСКИ ИЗ 5-го ИЗДАНИЯ ОСНОВ ХИМИИ

Глава I

О воде и ее соединениях

Стр. 61, 62

Можно привести не мало примеров и таких случаев поглощения газов жидкостями, которые ни в каком отношении не согласуются, даже приближенно, с законами растворимости. Так, например, углекислый газ поглощается раствором едкого кали в воде и из этого раствора уже не выделяется с понижением давления, если было достаточно едкого кали. Это случаи более тесного химического соединения. Менее развитое, но подобное же, явно химическое соотношение проявляется в некоторых случаях растворения газов в воде и пример этого мы разберем далее в растворе иодистого водорода, предварительно же остановимся над примечательным приложением закона Генри-Дальтона (33) к случаю растворения смеси двух газов, тем более, что явления, при этом происходящие, не могут быть предугаданы без ясного теоретического представления о природе газов (34).

---

(33) Пропорциональность между давлением и количеством растворяющегося газа была указана Генри в 1805 г., а Дальтон в 1807 г. показал применимость этого закона к случаю газовой смеси, введя то понятие о парциальном давлении, без которого закон Генри не мог получить истинного смысла. В понятии о распределении паров в газах (выноска 1-я) уже, в сущности, дано понятие о парциальном давлении, потому что давление влажного воздуха равно сумме давлений сухого воздуха и водяного пара, и признается, вслед за Дальтоном, что испарение в сухой атмосфере совершается как в пустоте. Необходимо, однако, заметить, что объем смеси двух газов (или паров) только приближенно равен сумме объемов составляющих (то же, конечно, относится и к давлениям), то-есть что *при смешении газов происходит перемена объема*, хотя и малая, но очевидная при точных измерениях. Браун (1888) показал, например, что, смешивая в равных объемах сернистый газ (SO^2) с углекислым (при равных давлениях 760 мм. и температурах), замечается уменьшение давления на 3,9 миллиметра. Возможность при подобных смешениях химического воздействия видна из того, что равные объемы SO^2 и CO^2 дают при —19°, по Пихте, (1888), жидкость, представляющую слабое химическое соединение (по подобию) или раствор, подобно тому, как соединяется SO^2 с H^2O в непрочное химическое целое.

(34) Начало общепринятой ныне **кинетической теории газов**, по которой частицы их оживотворены быстрым поступательным движением, очень давнее (Бернулли в прошлом столетии и др. уже развивали подобное представление), но общепринятою она сделалась после признания механической теории теплоты и развития, сделанного Кренигом (1855), а особенно после математической разработки Клаузиуса и Максвеля. Давление, упругость, диффузия, внутреннее трение, за-

Стр. 64

Насыщение газа жидкостью зависит, при этом, от того, что вошедшие в жидкость частицы газов сами не остаются в ней в покое, хотя

коны Бойль-Мариотта и Гей-Люссака и Авогадро-Жерара не только объясняются (дедуцируются) кинетическою теорией газов, но и выражаются с полным совершенством, так, например, величина внутреннего трения различных газов в точности была предсказана Максвелем, на основании приложения теории вероятности к столкновению газовых частиц. Поэтому кинетическую теорию газов должно считать блестящим приобретением последней половины текущего столетия. Скорость поступательного движения газовых частиц для газа, куб. сант. которого весит d граммов, выводится равною по теории квадратному корню из произведения $3\,p \cdot D \cdot g$, деленного на d, где p есть давление, при котором определено d, выраженное числом сантиметров ртутного столба, D есть граммовый вес куб. сант. ртути ($D = 13{,}59$, $p = 76$, следовательно, нормальное давление = 1033 гр. на кв. сант.) и g — напряжение тяжести в сантиметрах ($g = 980{,}5$ на уровне моря при широте 45°, = 981,92 в Петербурге, вообще изменяется с широтою и высотою места). Отсюда при 0° скорость водорода = 1843, кислорода 461 метров в секунду. Это скорости средние, и (по Максвелю и др.) надо думать, что отдельные частицы имеют скорости разные, то-есть находятся как бы в состоянии различного нагревания, что весьма важно принять во внимание при рассмотрении многих явлений, свойственных веществу. Из указанного определения скоростей очевидно, что различные газы, при одной и той же температуре и том же давлении, обладают средними скоростями, относящимися, как квадратные корни из плотностей, что выводится прямым наблюдением над истечением газов чрез тонкие отверстия и чрез пористые стенки. Этою *различною скоростью* истечения различных газов пользуются очень часто в химических исследованиях (см. след. главу и главу 7 о законе Авогадро-Жерара), чтобы разделить два газа, имеющие неодинаковые плотности и скорости. То же различие скоростей истечения определяет явление фонтана, приводимое в след. выноске для демонстрации существования внутреннего движения в газах.

Если бы для некоторой массы газа (совершенного), вполне точно следующего законам Мариотта и Гей-Люссака, единовременно изменялись температура t и давление p, то все изменения выражались бы равенством $pv = C(1 + at)$, или, что все равно, $pv = RT$, где $T = t + 273$, а C и R постоянные, изменяющиеся не только с переменою единиц, служащих для измерения, но и с изменением природы газа и его массы. Но так как существуют отступления от обоих основных газовых законов (о чем сказано будет в следующей главе) и следует, с одной стороны, принять некоторое притяжение между частицами газов, а с другой, что газовые частицы занимают сами часть пространства, то для обычных газов при сколько-либо значительных изменениях в давлениях и температурах следует принять формулу Ван-дер-Вальса

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = R(1 + at),$$

где a есть истинный коэффициент расширения газов. Так как действительный коэффициент расширения воздуха при атмосферном давлении между температурами 0° и 100° при определении его по изменению давления, = 0,00367 (по данным Реньо), а по изменению объема = 0,00368 (по определению Менделеева и Каяндера), а для других газов он хотя немного, но все же иной (см. след. главу), при больших же давлениях и плотностях значительно изменяется, то за истинный коэффициент расширения газов следует принять тот, который они все имеют при малых давлениях. Эта величина близка к 0,00367.

Формула Ван-дер-Ваальса имеет особо важное значение для случая перехода газов в жидкости, потому что основные свойства газов и жидкостей одинаково хорошо, хотя лишь в общих чертах, выражаются приведенною формулою.

Развитие вопросов, относящихся к задетым здесь предметам, имеющим особый интерес для теории растворов, как жидкостей, должно искать в мемуарах и сочинениях по теоретической и физической химии. Малая часть предмета этого отчасти рассматривается в выносках следующей главы.

и вступают с частицами жидкости в согласный род движения, а потому с поверхности жидкости (как и ее пары, если жидкость летуча) выбрасываются. Если в единицу времени одинаковое число частиц газа проникает (вскочит) в жидкость и выйдет (или выскочит) из нее, наступит насыщение. Оно представляет случай подвижного равновесия, а не покоя. Поэтому, если давление уменьшить, число выходящих частиц будет превосходить число входящих и новое подвижное равновесие наступит только при новом равенстве числа частиц, входящих и выходящих из жидкости. Так объясняются главные черты растворения, кроме того специального (химического) притяжения (проникновения и согласного движения) газа к жидкости, которое определяет как меру растворимости, так и степень постоянства происходящих растворов.

Глава II

О составе воды и водороде

Стр. 100—101

Все другие газы представляют при небольшом возрастании давления выше атмосферного бо́льшую сжимаемость и бо́льший коэффициент расширения, чем следует по законам Мариотта и Гей-Люссака, а водород, напротив того, тогда менее сжимается, чем следует по закону Мариотта (25), и при повышении давления расширяется немного меньше, чем при атмосферном давлении (26).

---

(25) Для данной массы газа, при постоянной температуре, по закону Бойля-Мариотта, объем уменьшается во столько раз, во сколько увеличивается давление, то-есть закон этот требует, чтобы произведение из объема v на давление p для данной массы газа было величиною постоянною: $pv = C$, то-есть не меняющеюся с переменою давления. В действительности это уравнение близко и точно выражает наблюдаемое отношение объема к давлению, но только при сравнительно небольших переменах давления, плотности или объемов. Если же эти изменения сколько-либо значительны, то величина pv оказывается зависящею от давления и с возрастанием давления величина pv или растет, или уменьшается. В первом случае сжимаемость меньше, чем по закону Мариотта, во втором больше. Первый случай мы будем называть положительным отступлением (потому что тогда производная $d(pv)/d(p)$ более нуля), второй отрицательным (потому что тогда производная отрицательная меньше нуля). Измерения, сделанные мною с М. Л. Кирпичевым и Гемилианом, показали, что все исследованные газы при малых давлениях, то-есть при значительном разрежении, представляют положительные отступления. С другой стороны, из исследований Наттерера, Каньяте и Амага оказывается, что все газы при больших давлениях (когда получается объем 500—1000 раз меньший, чем под атмосферным давлением) представляют также положительные отступления. Так, при давлении в 2700 атмосфер воздух сжимается (не в 2700 раз) лишь в 800, а водород в 1000 раз. Следовательно, положительный род отступлений, так сказать, нормальный для газов. Оно и понятно. Если бы какой-либо газ следовал закону Мариотта или бы сжимался еще больше, то при значительных давлениях он достигал бы плотности большей, чем у твердых и жидких тел, что невероятно само по себе и невозможно уже потому, что твердые и жидкие тела сами мало сжимаемы. Так, например, куб. сант. кислорода весит при 0° и атмосферном давлении около 0,0014 гр., а при давлении в 3000 атмосфер (в пушках достигается такое давление) он весил бы 4,2 гр., то-есть был бы в четыре раза тяжелее воды, если бы последовал Мариоттову закону; при давлении в 10000 атмосфер он был бы тяжелее ртути. Кроме того, положительные отступления вероятны и в том смысле,

Глава III

Кислород и главные виды его солеобразных соединений

стр. 124

Кислородный газ, как все газы, прозрачен и, как бо́льшая часть газов, бесцветен. Запаха и вкуса он не имеет, что понятно уже из того, что он находится в воздухе. Удельный вес его (то-есть вес 1-го куб. сантиметра в граммах при 0° и 760 мм. давления) равен 0,0014298

что самим частицам газа надо приписать свой объем. Допустив, что закону Мариотта подчиняется только междучастичное пространство, получим необходимость положительных отступлений. Если объем самой частицы газа назовем чрез b (как у Ван-дер-Ваальса, см. гл. 1, вын. 34), то должно ждать $b(v—b) = C$, откуда $pv = C + bp$, что и выражает положительные отступления. Полагая для водорода $pv = 1000$ при давлении 1 метра, получаем, по данным опытов Реньо, Амага и Наттерера, b близким к 0,7 (до 0,9).

Итак, нормальным законом сжимаемости газов должно считать возрастание pv с возрастанием давления. Водород *при всех давлениях* и представляет такую положительную сжимаемость, потому что он и при давлениях высших, чем атмосферное, представляет, по исследованиям Реньо, положительные отступления от закона Мариотта. Следовательно, водород есть газ, так сказать, образцовый. Ни один другой газ не относится столь просто к перемене давлений. Все другие газы, при давлениях от одной до 30 атмосфер, представляют отрицательные отступления, то-есть тогда сжимаются больше, чем следует по закону Мариотта, как показали измерения Реньо, оправдавшиеся при повторении их мною и Богузским. Так, например, при перемене давления от 4-х до 20 метров ртутного столба, то-есть при увеличении в 5 раз, объем уменьшался только в 4,93 раза, когда был взят водород, и для воздуха в 5,06 раз.

Отступления от **Бойль-Мариоттова закона** при значительных давлениях (от 1 до 3000 атмосфер) хорошо выражаются (при постоянных температурах) вышеупомянутой (гл. 1 вын. 34) формулой Ван-дер-Ваальса (еще лучше сходной с нею формулою Клаузиуса), но так как она (равно как и формула Клаузиуса) не выражает вовсе существования положительных отступлений от закона при давлениях малых, а они по вышеупомянутым определениям, сделанным мною с Кирпичевым и Гемильяном и проверенным (двумя способами) К. Д. Краевичем — свойственны всем газам (даже легко сжижающимся в жидкости, например CO^2, SO^2), то такие формулы, передавая верно явления уплотнения и даже перехода в жидкость, не отвечают случаю сильного разрежения газов, то-есть тому, когда газ приближается к состоянию наибольшего разъединения или удаления частиц, и представляет, быть может, переход к веществу, называемому световым эфиром, наполняющему междупланетное и междузвездное пространство. Если же представим себе, что газы способны разрежаться лишь до определенного предела, достигнув которого (подобно твердым телам) не меняют своего объема с уменьшением давления, то, с одной стороны, станет понятным переход атмосферы на верхних ее пределах в однообразную, эфирную среду, а с другой должно будет ждать при больших разрежениях (т. е. при больших объемах для малых масс газов или при крайнем удалении газа от жидкого состояния) именно положительных отступлений от Бойль-Мариоттова закона. В этой области сильно разреженных газов наши современные сведения ничтожны, а их восполнение обещает многое уяснить в природе. К трем состояниям вещества (твердому, жидкому и газовому), очевидно, должно прибавить еще четвертое — эфирное (как предлагал уже Крукс), подразумевая под ним вещество в крайнем возможном для него разрежении.

(26) Закон Гей-Люссака гласит, что все газы и во всех состояниях представляют один коэффициент расширения 0,00367, то-есть при нагревании от 0° до 100° расширяются, как воздух, а именно из тысячи объемов газа, измеренного при 0°, при 100° получается 1367 объемов. Реньо в 50-х годах показал, что закон Гей-Люссака не вполне точен и что разные газы, а также и один газ при разных давлениях имеют не совершенно одинаковые коэффициенты расширения. Так, расширение от 0°

грамма, а литр весит 1,4298 грамма, следовательно, он немного плотнее воздуха. Плотность его по отношению к воздуху, = 1,1056, в отношении же к водороду = 16 (точнее 15,96) (21).

до 100° для воздуха при обыкновенном давлении одной атмосферы = 0,367, а при 3-х атмосферах 0,371, для водорода 0,366, для углекислого газа 0,370. Впрочем, Реньо определял не прямо изменение объема от 0° до 100°, а измерял изменение упругости при перемене температуры, а так как газы не вполне следуют Мариоттову закону, то по изменению упругости нельзя прямо судить об изменении объема. Исследования же, сделанные мною и Каяндером в 70-х годах, прямо показывают перемену объема при нагревании от 0° до 100°. Эти исследования подтвердили вывод Реньо относительно неполной точности закона Гей-Люссака и показали, сверх того: 1) что расширение на объем 1 от 0° до 100° при давлении одной атмосферы равно для воздуха 0,368, для водорода 0,367, для углекислого газа 0,373, для бромистого водорода 0,386 и т. д.; 2) что для газов, более сжимаемых, чем следует по Мариоттову закону, с возрастанием давления расширение от нагревания растет, например, при $3^1/_2$ атмосферного давления для воздуха оно равно 0,371, для углекислого газа при 1 атмосфере 0,373, при 3 атмосферах 0,389, при 8 атмосферах 0,413; 3) что для газов, менее сжимаемых, чем следует по закону Мариотта, напротив того, с возрастанием давления расширение объема от теплоты уменьшается, например, для водорода при 1 атмосфере 0,367, при 8 атмосферах 0,366, для воздуха при $^1/_4$ атмосферного давления 0,370, при 1 атмосф. давлении 0,368, а водород, равно *как и воздух* (как и все газы), при *малых давлениях* именно и сжимается менее, чем следует по закону Мариотта (при бо́льших, чем атмосферное давление, воздух наоборот), как показали исследования мои с Кирпичевым и Гемилианом. Таким образом, водород, начиная от нулевого давления до самых высших давлений, представляет постепенно, хотя и очень мало, уменьшающийся коэффициент расширения, тогда как для воздуха и других газов, при атмосферном давлении и высших давлениях, коэффициент расширения увеличивается по мере возрастания давления, пока сжимаемость больше, чем по закону Бойль-Мариотта. Но когда, при значительных давлениях, этот вид отступлений перейдет в нормальный (см. вын. 25), тогда для всех газов коэффициент расширения уменьшается с возрастанием давления, как видно из наблюдений Амага. Этими отношениями объясняется различие двух коэффициентов расширения — при постоянном давлении и при постоянном объеме. Так, например, для воздуха при давлении в 1 атмосферу истинный коэффициент расширения (постоянное давление — изменяется объем) = = 0,00368 (по определению Менделеева и Каяндера), а изменение упругости (объем постоянный, по данным Реньо) = 0,00367.

(21) Так как вода состоит из 1 объема кислорода и 2-х водорода и содержит на 2 весовые части водорода 16 весовых частей кислорода, то уже из этого следует, что кислород в 16 раз плотнее водорода. Обратно, зная плотности водорода и кислорода и объемный состав воды — выводится весовой состав воды. Эта взаимная и разностороняя проверка — составляет своего рода методу, которая укрепляет фактические сведения точных наук, заключения которых прежде всего требуют возможной точности и разнообразия проверки для исходных своих понятий.

Заметим, что теплоёмкость кислорода при постоянном давлении 0,2175, следовательно относится к теплоёмкости водорода (3,409), как 1 относится к 15,6, следовательно теплоёмкости обратно пропорциональны весам равных объемов. Это значит, что равные объемы обоих газов имеют (почти) одинаковую теплоёмкость, то-есть требуют для нагревания на 1° одинакового количества тепла. В особом месте, далее, теплоёмкость разных веществ будет рассматриваться подробнее, а потому над нею мы теперь не останавливаемся.

Кислород мало растворим в воде и других жидкостях, как большая часть трудно сжижаемых газов. При обыкновенной температуре 100 объемов воды растворяют около 3 объемов кислорода, а именно: при 0° 4,1 объема, при 10° 3,3, а при 20° 3,0 (измеряя объемы при тех же температурах, какие имеет вода). Из этой растворимости кислорода видно, что вода, оставаясь в воздухе, должна поглощать, то-есть растворять кислород. Этот-то кислород и служит для дыхания рыб. В отварной воде не могут жить рыбы, потому что не имеют кислорода, необходимого для дыхания. (См. гл. 1).

Глава VII

Объемы реагирующих газов

Стр. 239—240

С установлением незыблемого понятия о частицах и атомах, химические формулы стали прямо выражать не только состав [22], но и частичный вес, то-есть **плотность паров**, следовательно, ряд основных химических и физических сведений о веществе, так как от плотности пара или частичного веса и состава тел зависит множество их свойств. Так, плотность пара $D = \frac{M}{2}$. Например, формула серного эфира (входящего в состав гофманских капель) есть $C^4H^{10}O$, следовательно, вес ей отвечающий $= 74$, а потому плотность паров эфира $= 37$, как оно и есть в действительности. Поэтому плотность паров и газов перестала быть (эмпирическою) величиною, получаемою лишь из опыта, и приобрела рациональный смысл. Стоит затем лишь помнить, что 2 грамма водорода или граммовый частичный вес этого исходного газа занимает, при 0° и 760 мм. давления, объем 22,3 литра (или 22300 куб. сантиметров), чтобы прямо от формул переходить к весам кубических мер газов и паров, потому что и всякие другие **граммовые частичные веса паров** занимают при 0° и 760 мм тот же объем 22,3 литра. Так, например, для углекислого газа CO^2 частичный вес $M = 44$, отсюда 44 грамма CO^2 при 0° и 760 мм. занимают объем 22,3 литра, следовательно литр весит 1,97 гр. Соединяя законы газов: Гей-Люссака, Мариотта и Авогадро-Жерара, получаем (23) общую формулу для газов:

$$6255\, s(273+t)=Mp,$$

где s есть вес в граммах одного куб. сантиметра пара или газа, при температуре t и давлении p (выражая его сантиметрами ртутного столба), если частичный вес газа $= M$. Так, например, при 100° и при давлении 76 сант. (т. е. при атмосферном), вес куб. сантиметра паров эфира ($M = 74$) равен $s = 0{,}0024$ (24).

---

(23) Формула эта (данная мною в сочинении «Об упругости газов» и в «Comptes Rendus 1876 Fevr.» несколько в ином виде) выводится следующим образом. По закону Авогадро-Жерара для всех газов $M = 2D$, где M есть частичный вес, а D — плотность по водороду. Но они = весу в граммах куб. сантиметра газа S_0 при 0° и 76 сант. давления, деленному на 0,0000896, ибо это есть вес в граммах куб. сантиметра водорода. А вес s куб. сант. газа при температуре t и давлении p (в сантиметрах) равен $sp/76\ (1 + \alpha t)$. Поэтому $s_0 = s \cdot 76\ (1 + \alpha t) \cdot p$, следовательно $D = 76 \cdot s(1+\alpha t)\ 0{,}0000896\ p$, откуда $M = 152\ s\ (1 + \alpha t) \cdot 0{,}0000896\ p$, что и дает вышеприведенное выражение, потому что $\frac{1}{\alpha} = 273$. Вместо s можно взять $\frac{m}{v}$, где m есть вес, v — объем паров.

(24) Предлагаемую формулу прямо можно применять при нахождении частичного веса по данным плотности пара, так как s=весу паров m, деленному на объем v, следовательно по опыту $M = 6255 \cdot m(273 + t)/pv$. Поэтому вместо формулы (см. гл. 2, вын. 33) $pv = R(273 + t)$, где R изменяется с массою и природою газа, можно применять формулу: $pv = 6255\,(m/M)\,(273 + t)$, а взяв вес газа m, равный весу его частицы, $pv = 6255\ (273 + t)$ для всех газов.

Так как частицы многих простых тел (H^2, O^2, N^2, Cl^2, Br^2, S^2 — по крайней мере при высоких температурах) составлены однообразно, то для сложных тел, ими образованных, формула прямо показывает объемный состав. Так, например, формула HNO^3 прямо показывает, что при разложении азотной кислоты получится 1 объем водорода, 1 объем азота и 3 объема кислорода.

А так как от элементарного и объемного состава и от плотностей пара прямо зависит множество механических, физических и химических свойств, то принятая система атомов и частиц дает возможность упростить множество сложнейших отношений.

Глава XIV

Эквивалентность и теплоёмкость металла

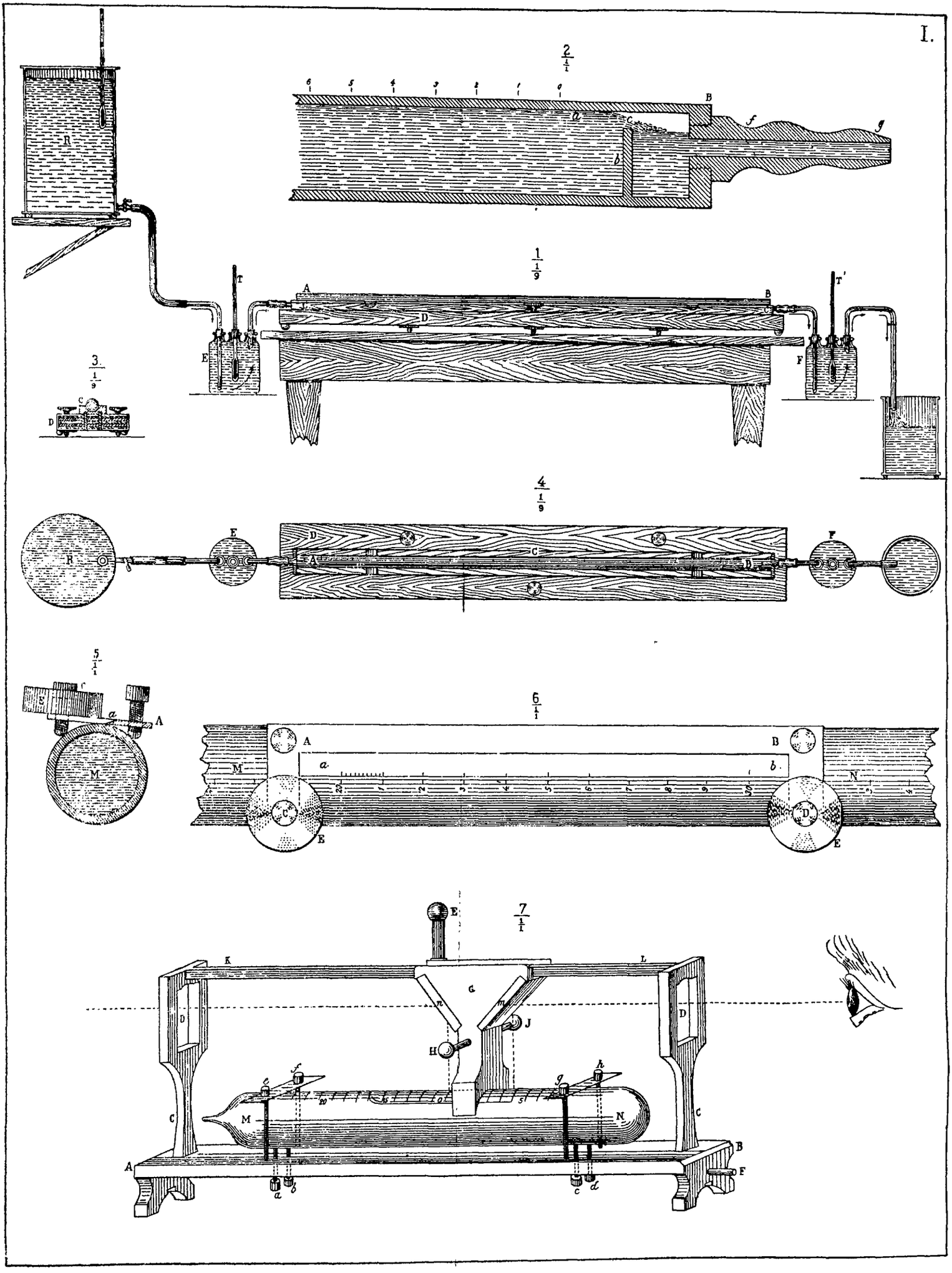
Стр. 425—427

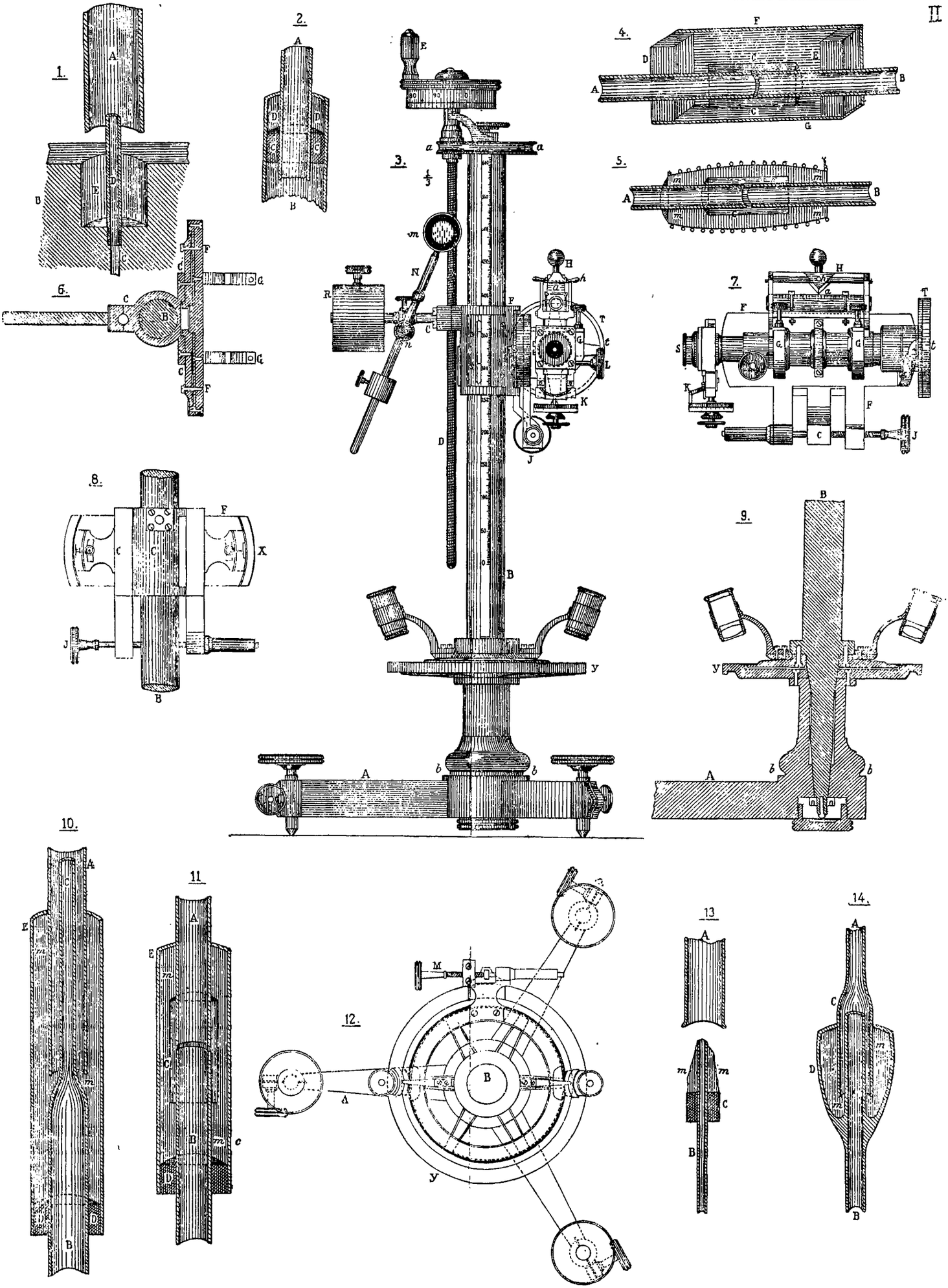
Так как теплоемкость или количество тепла, потребное для нагревания единицы веса на один градус [6], есть величина сложная, содержащая не только приращение энергии вещества с переменою его температуры, но также внешнюю работу расширения [7] и внутреннюю работу, совершающуюся в частицах и влекущую их к распадению по мере повышения температуры, то в величине теплоемкости нельзя ждать большой простоты отношения к составу, как видим, например, в плотности газообразных тел. Поэтому, хотя теплоёмкость дает одно из важных средств для суждения об атомности элементов, но главную опору для уверенного суждения об атомности дает лишь закон Авогадро-Жерара. Все прочие средства служат лишь подсобными или предварительными, пока не имеется возможности прямо прибегнуть к определению плотностей пара.

Редактор *Е. Д. Волова.*
Технический редактор *Б. П. Спиро.*
Корректор *В. Л. Новицкая.*

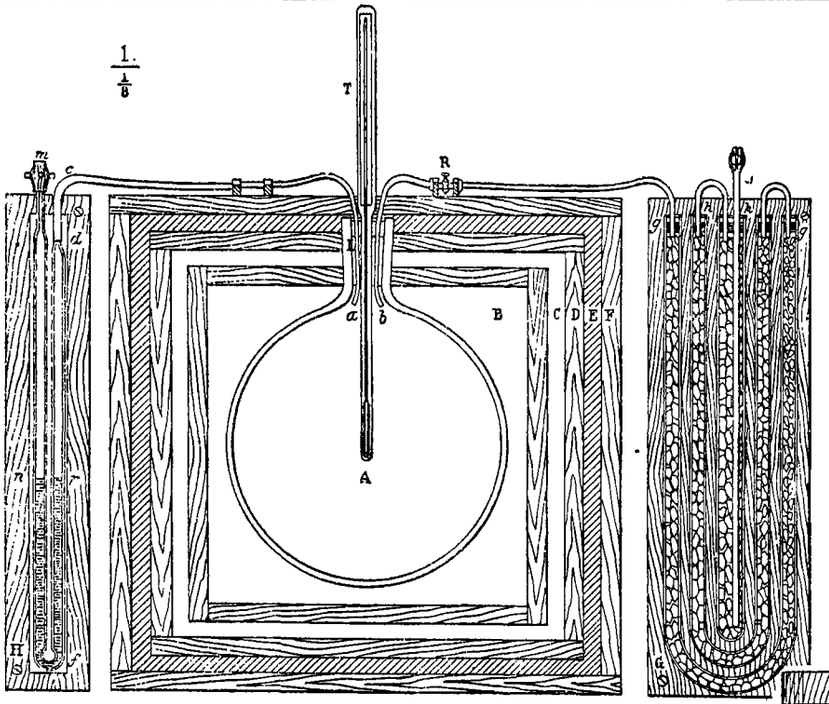
Сдано в набор 4/II-1938 г. Подписано к печати 14/XII-1938 г. Тираж 2500
Формат бумаги 60×92 Окуловской ф-ки Автор. лист. 50.
Печ. лист. 43¹/₄. Бум. лист. 21⁵/₈ + 12 вкл. Колич. печатных знаков в бум. листе 103168.
Индекс ХЛ-11-15-4. Заказ № 116 Леноблгорлит № 4624

4-я тип. ГОНТИ «Красный Печатник». Ленинград, Международный пр., 75а.

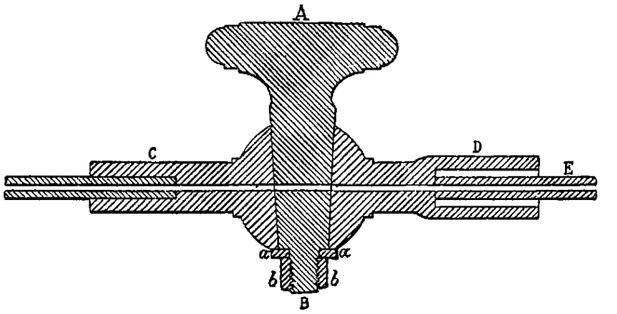

2
1
1
9
3
1
9
4
1
9
5
1
1
6
1
1
7
1
1
R
T
T'
A
B
C
D
E
F
a
b
f
g
M
N
K
L
G
H
J
h
i
k
l
m
n
o
p
q
r
s
t
u
v
w


1.
2.
3.
4.
5.
6.
7.
8.
9.
10.
11.
12.
13.
14.

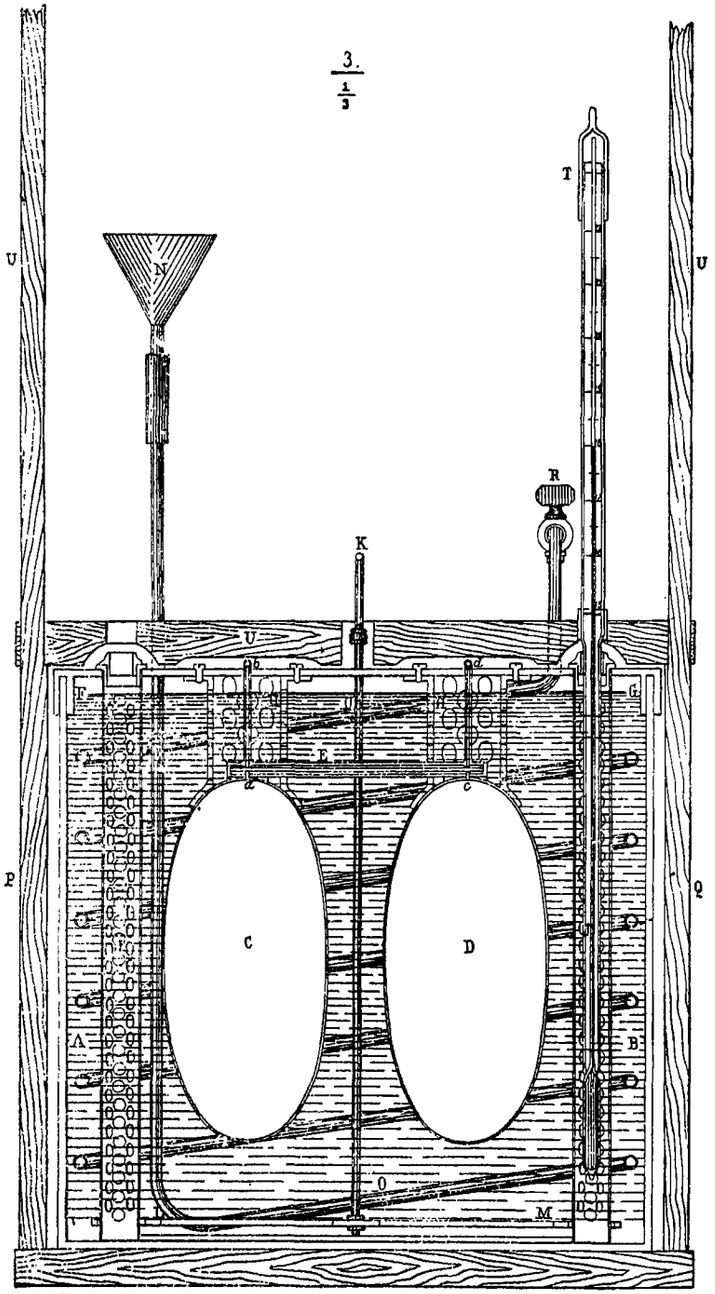
1.
1/8



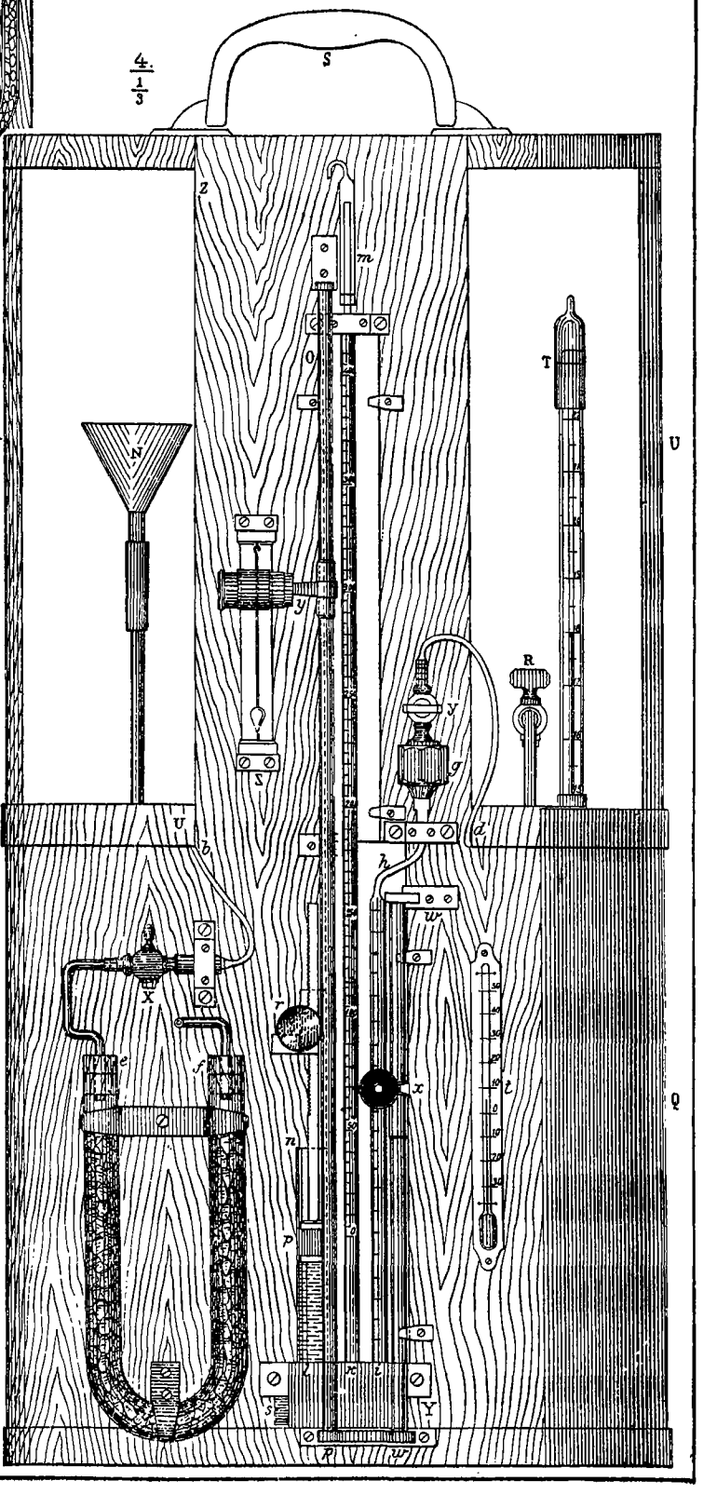
2.
1/1

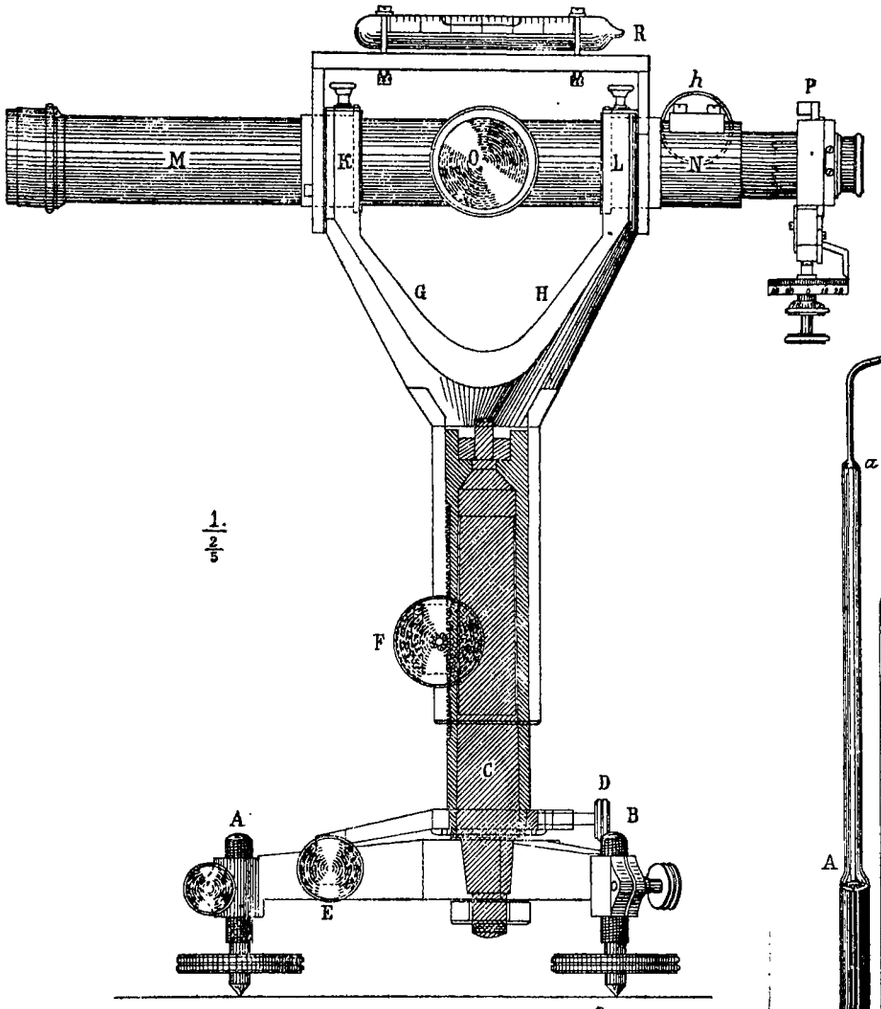


3.
1/3

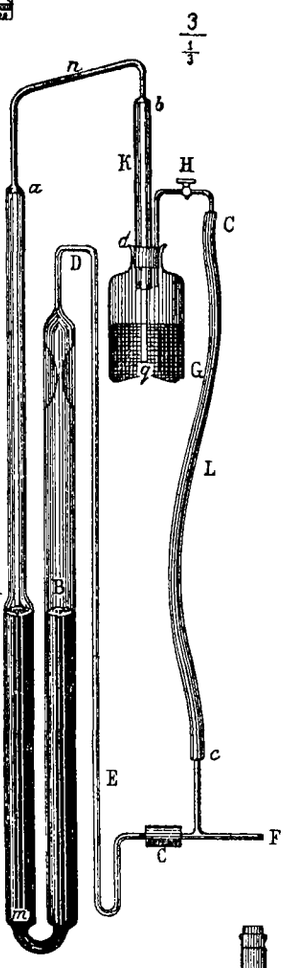


4.
1/3

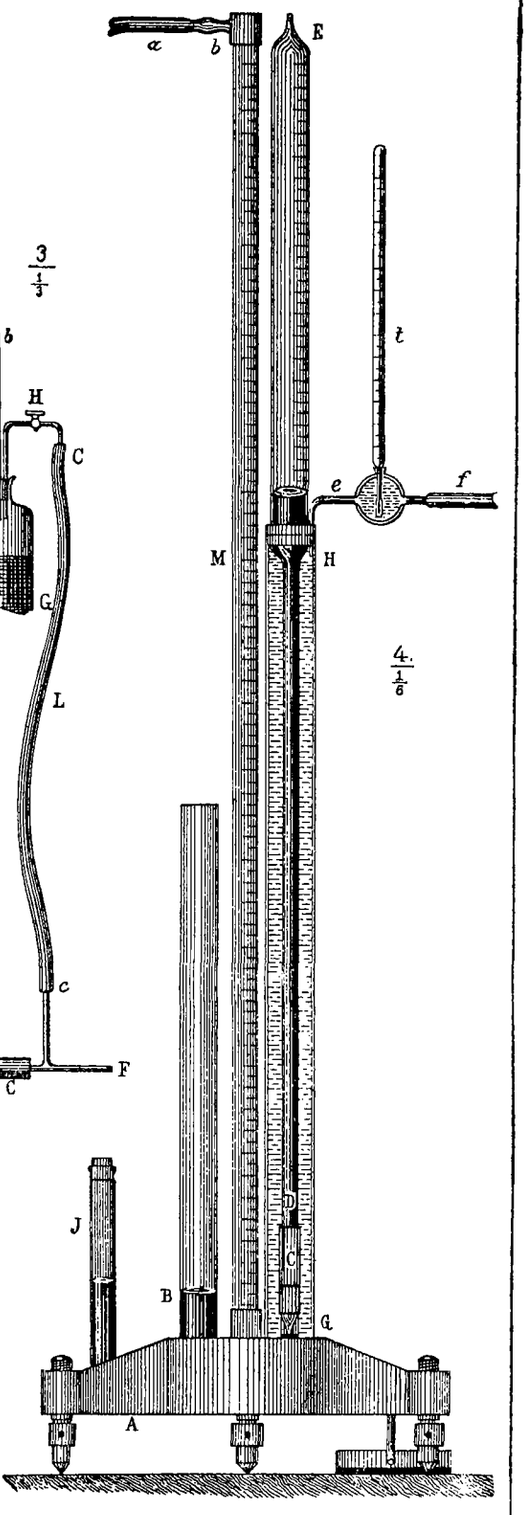




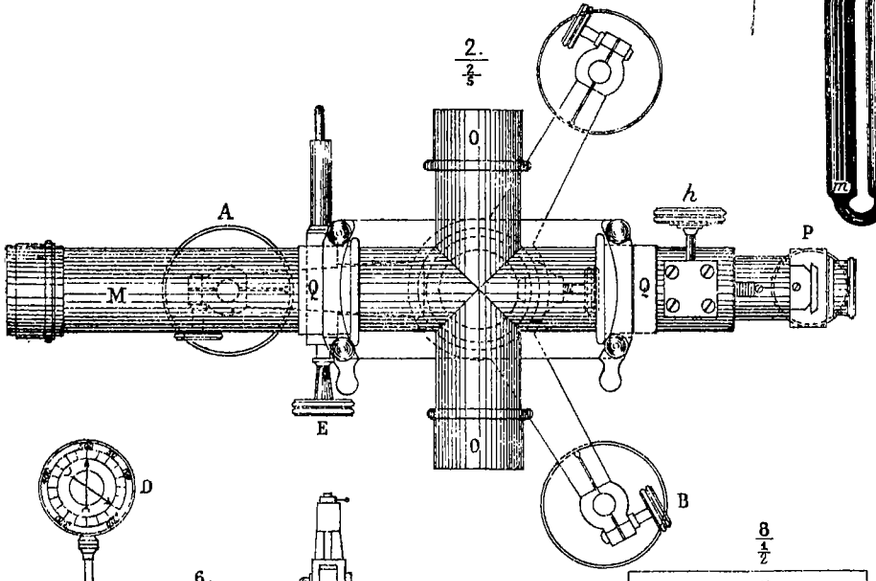
1. $\frac{2}{5}$



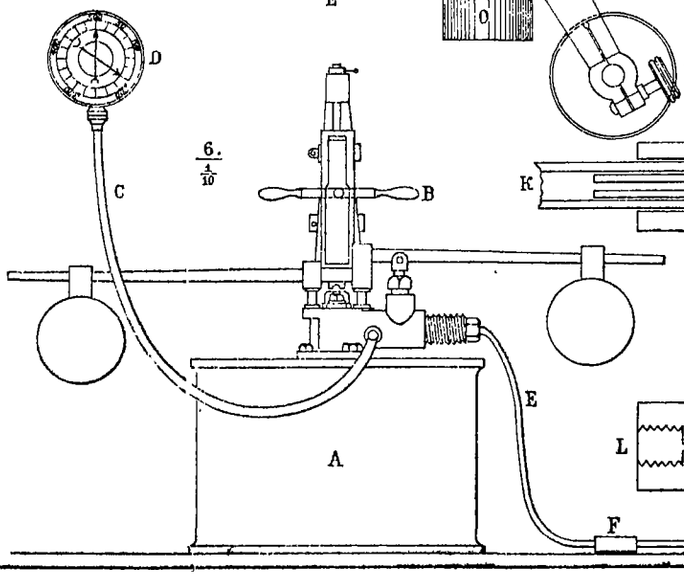
3 $\frac{1}{3}$



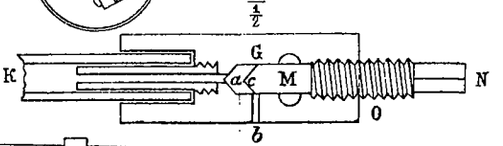
4. $\frac{1}{6}$



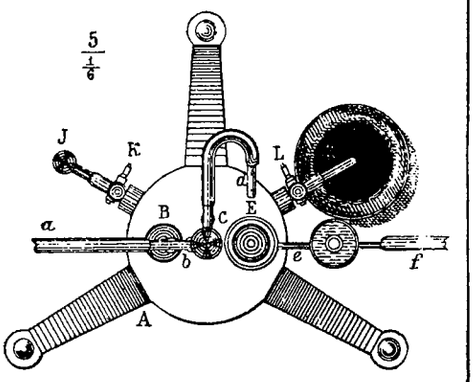
2. $\frac{2}{5}$



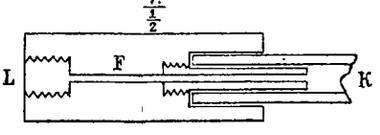
6. $\frac{1}{10}$



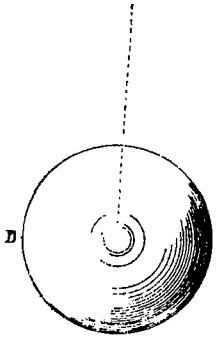
8 $\frac{1}{2}$



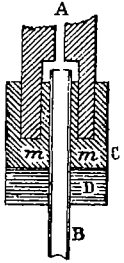
5 $\frac{1}{6}$



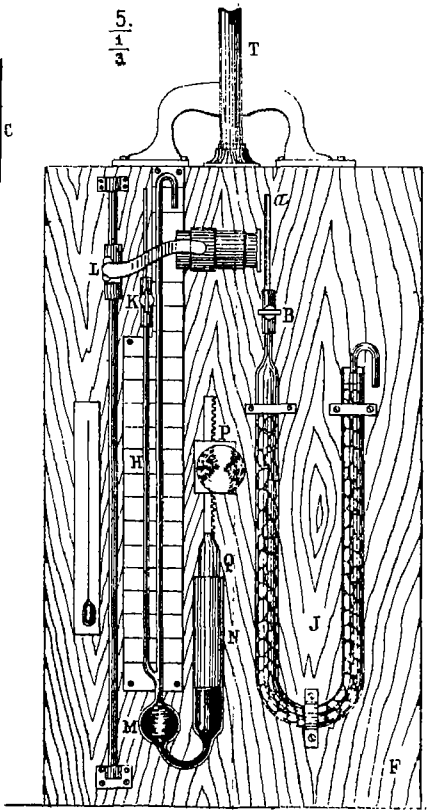
7. $\frac{1}{2}$



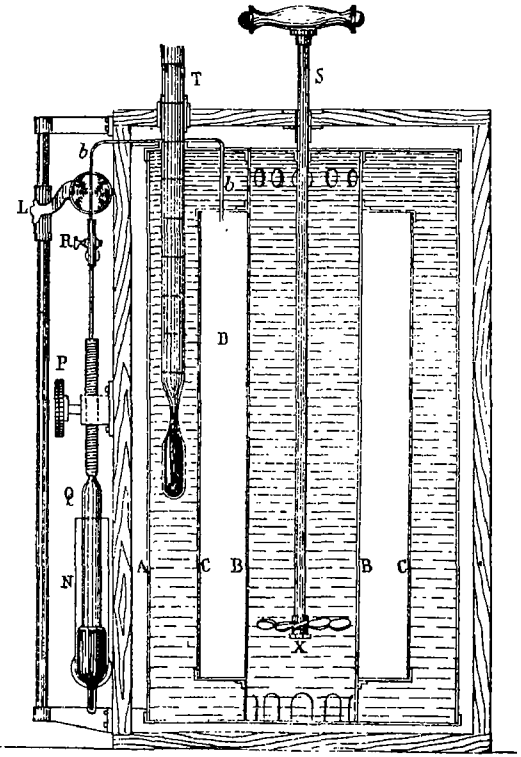
7. 1/1



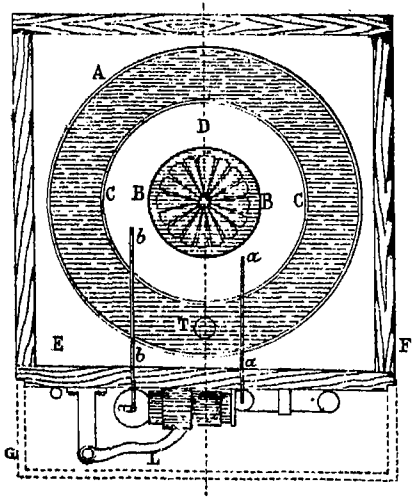
5. 1/3



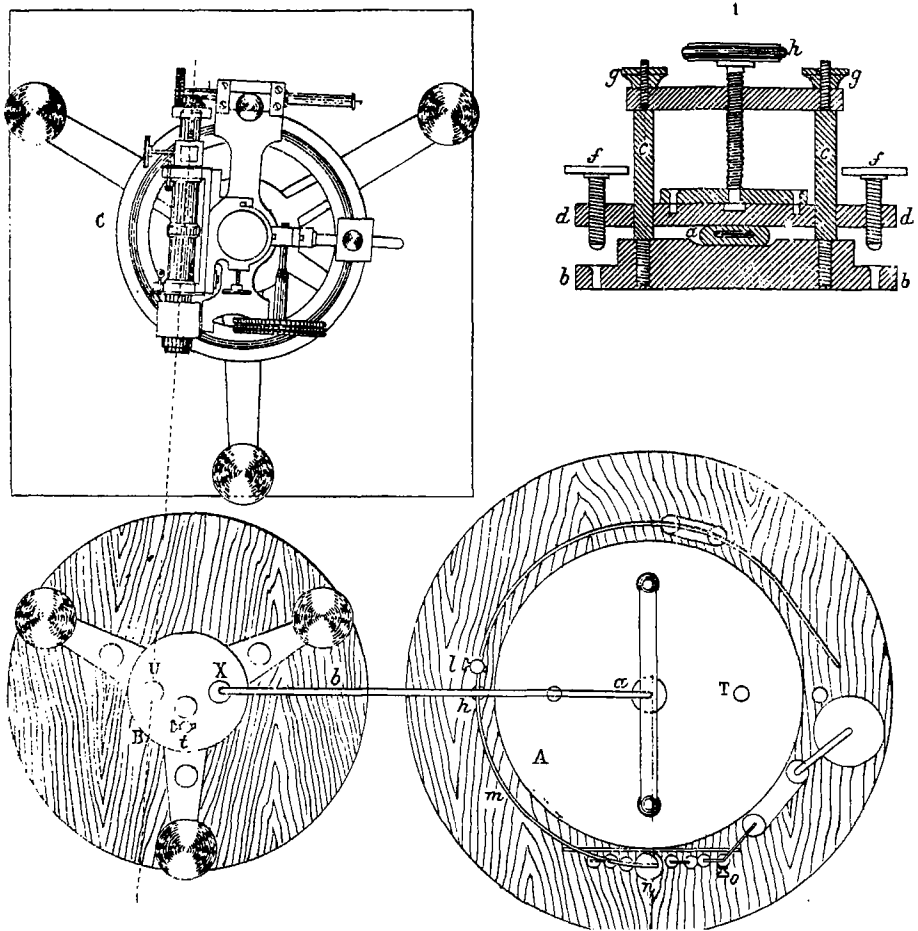
6. 1/3



4. 1/3

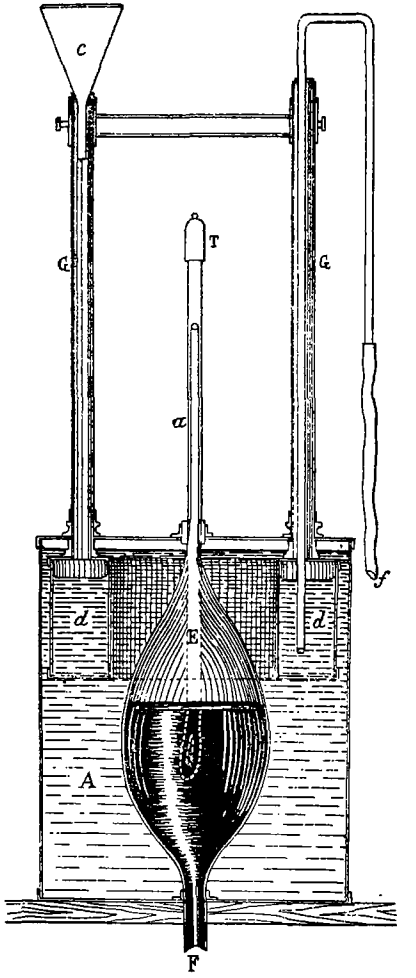


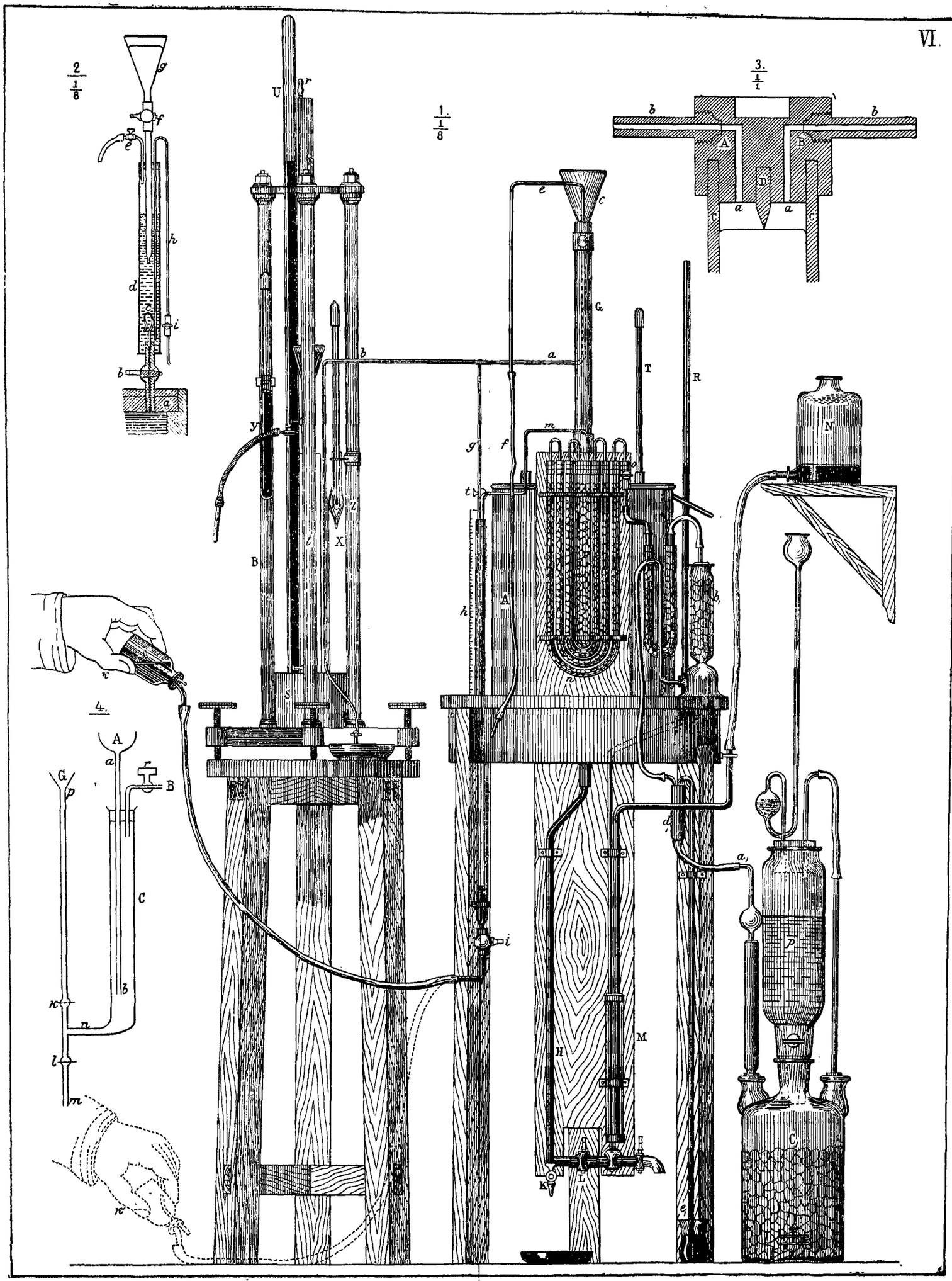
1/8

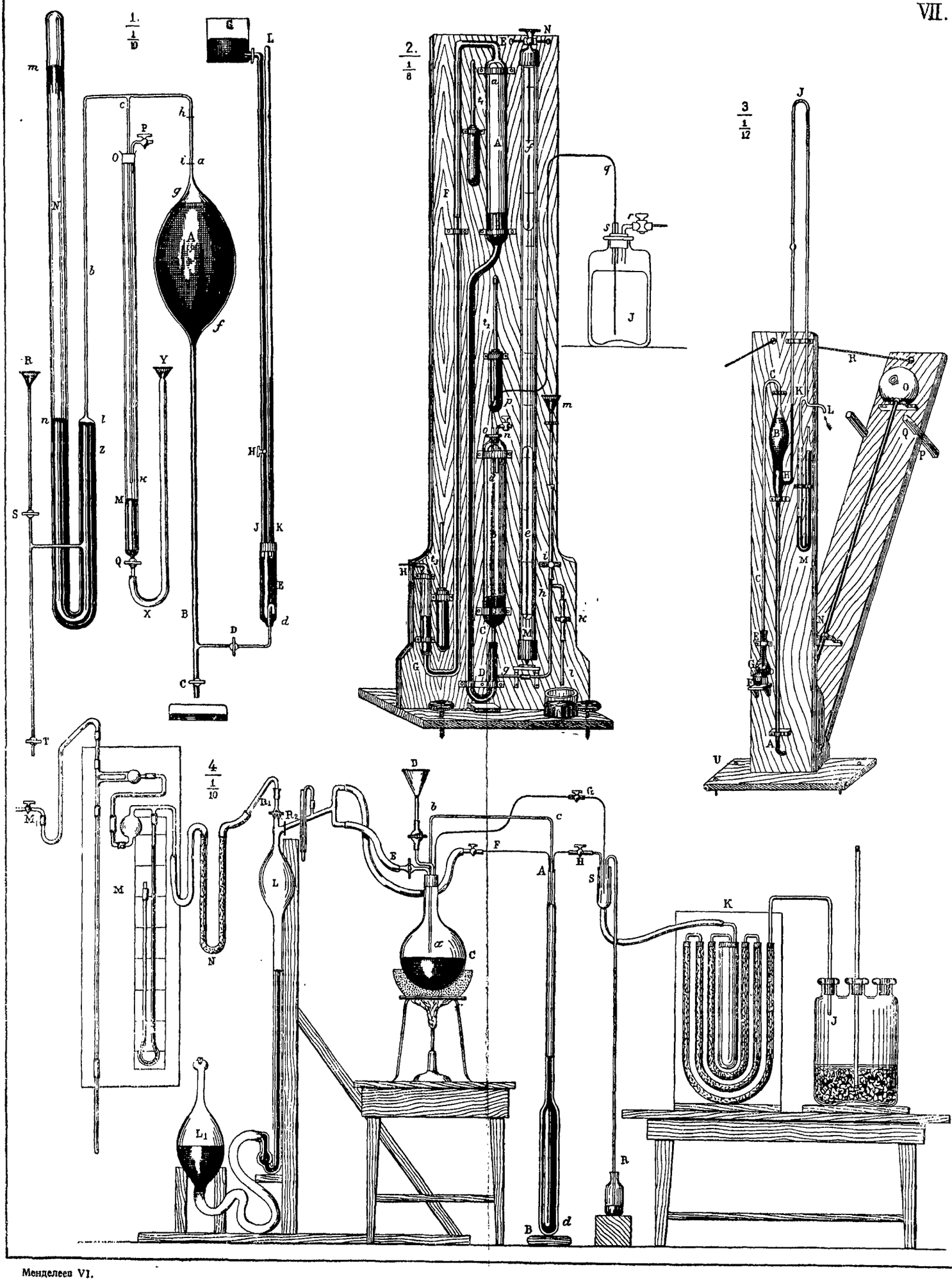


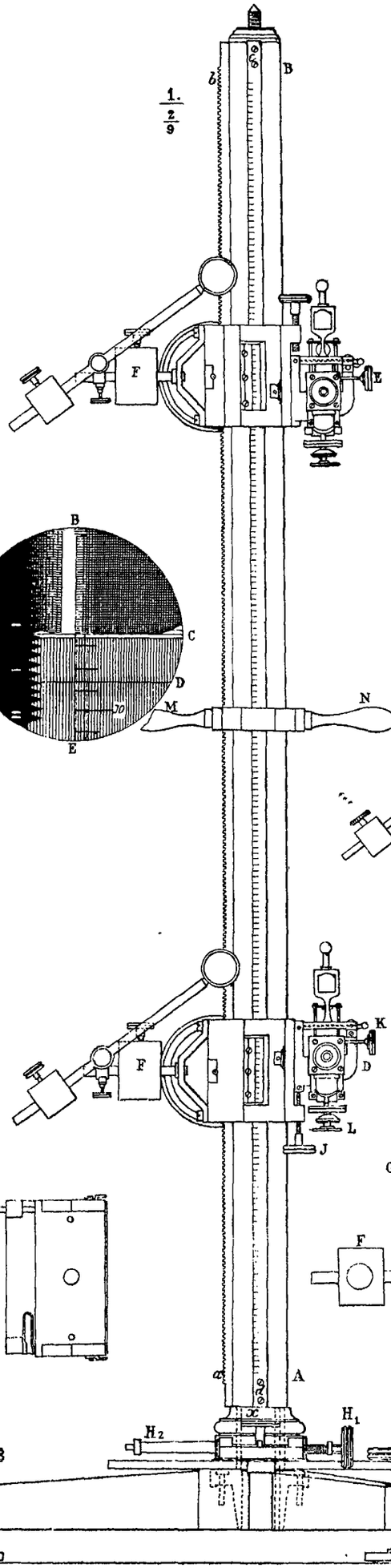
3/1

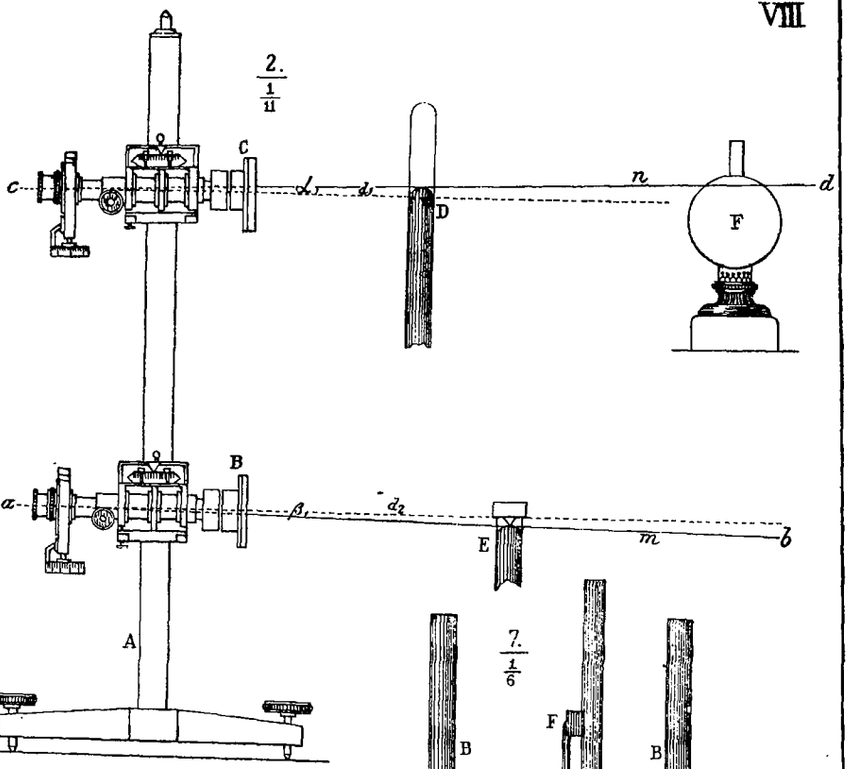
2/8

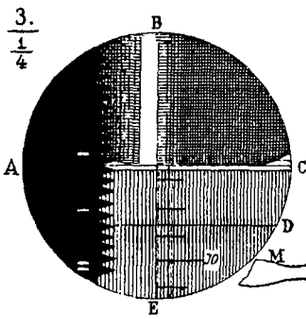


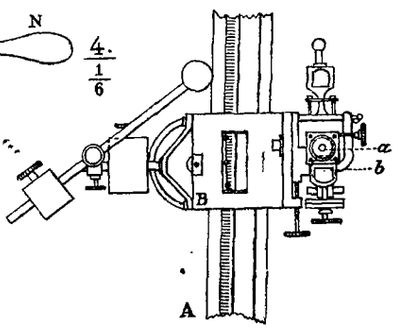

2
1/8
1.
1/8
3.
1/1
4.
A
B
C
D
G
T
R
N
P
M
H
K
L
U
X
Y
Z
S


1.
1/9
2.
1/8
3
1/12
4
1/10

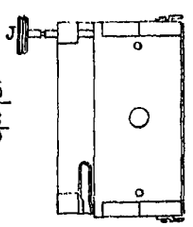

1.
2/9
b
B
F
E
a
A
H2
H1
x

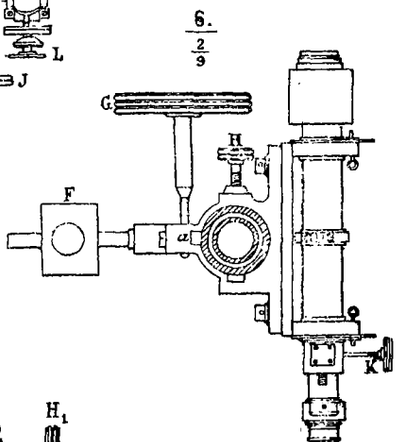

2.
1/11
c
C
D
n
d
F
a
B
E
m
b
A

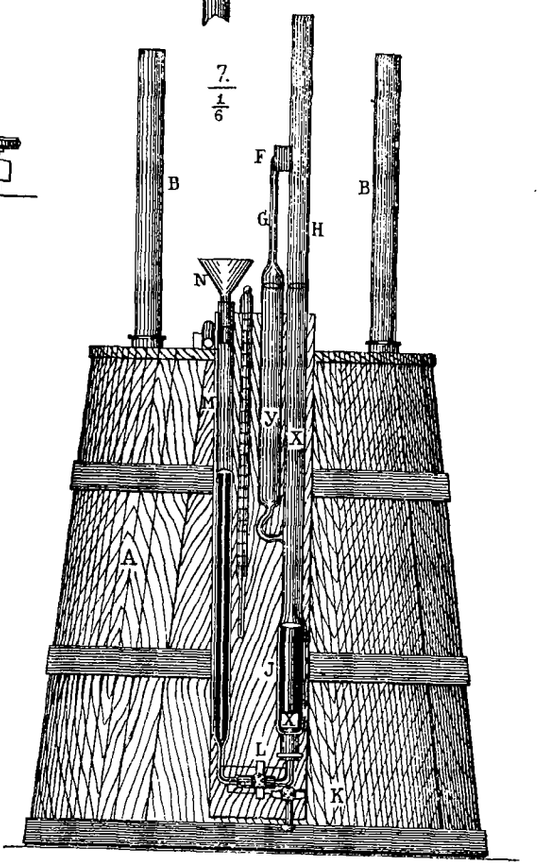

3.
1/4
B
A
C
D
M
N
E

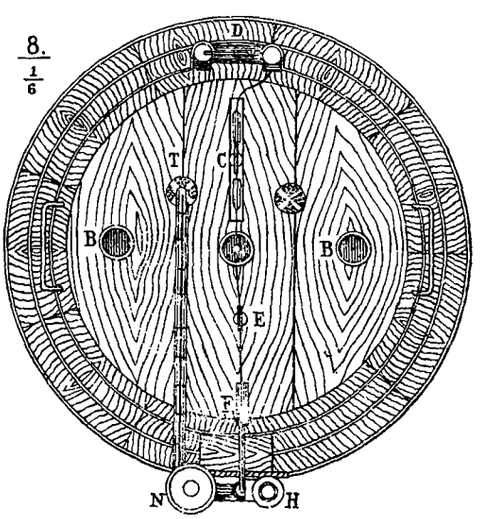

4.
1/6
a
b
B
A

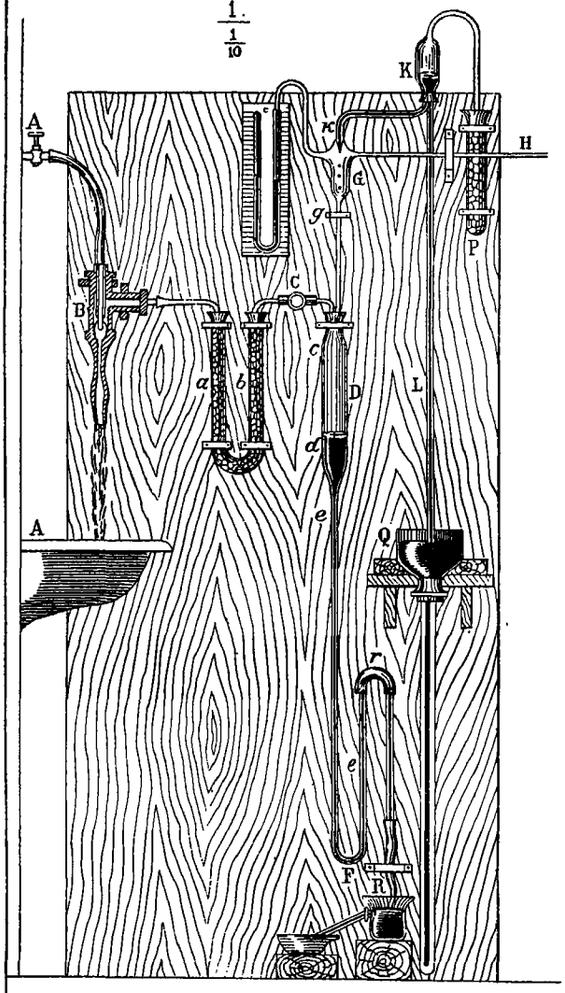
F
K
D
L
J

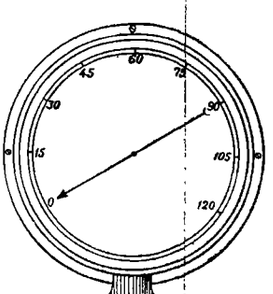

5
2/9
J

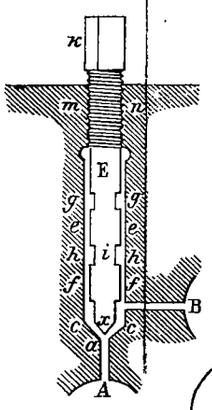

6.
2/9
G
H
F
a
K

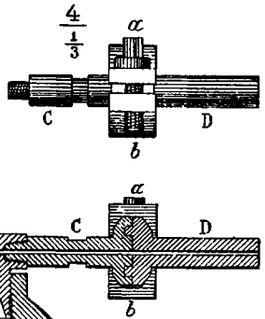

7.
1/6
B
F
G
H
N
M
y
X
J
L
K
A

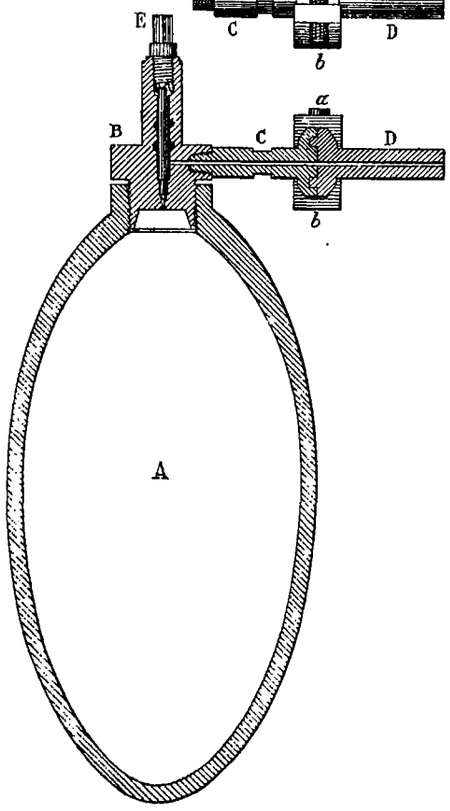

8.
1/6
D
T
C
B
E
F
N
H

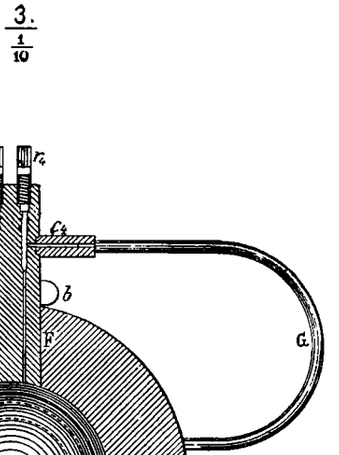

1.
1/10
K
A
H
G
g
P
B
C
c
a
b
D
L
d
e
A
Q
F
R

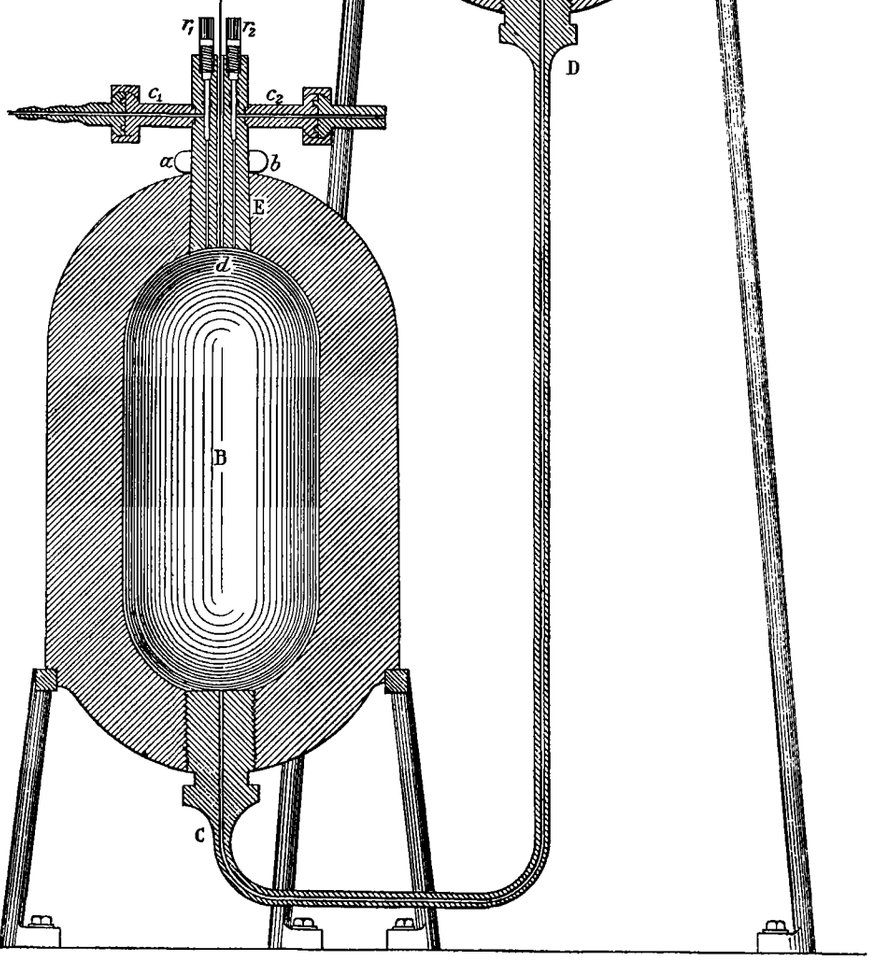

0
15
30
45
60
75
90
105
120

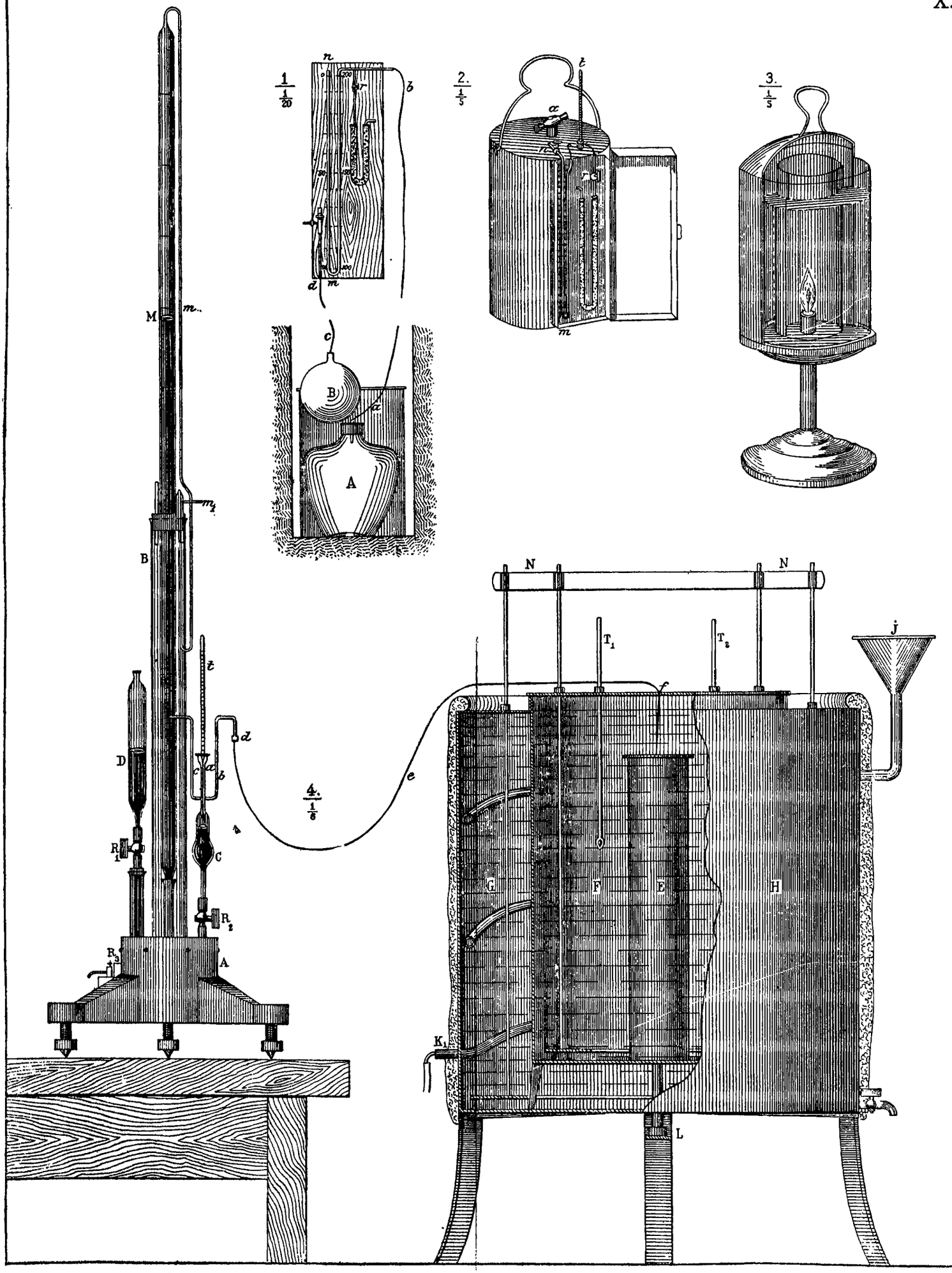

2.
K
m
n
E
g
e
h
i
f
B
x
c
d
A

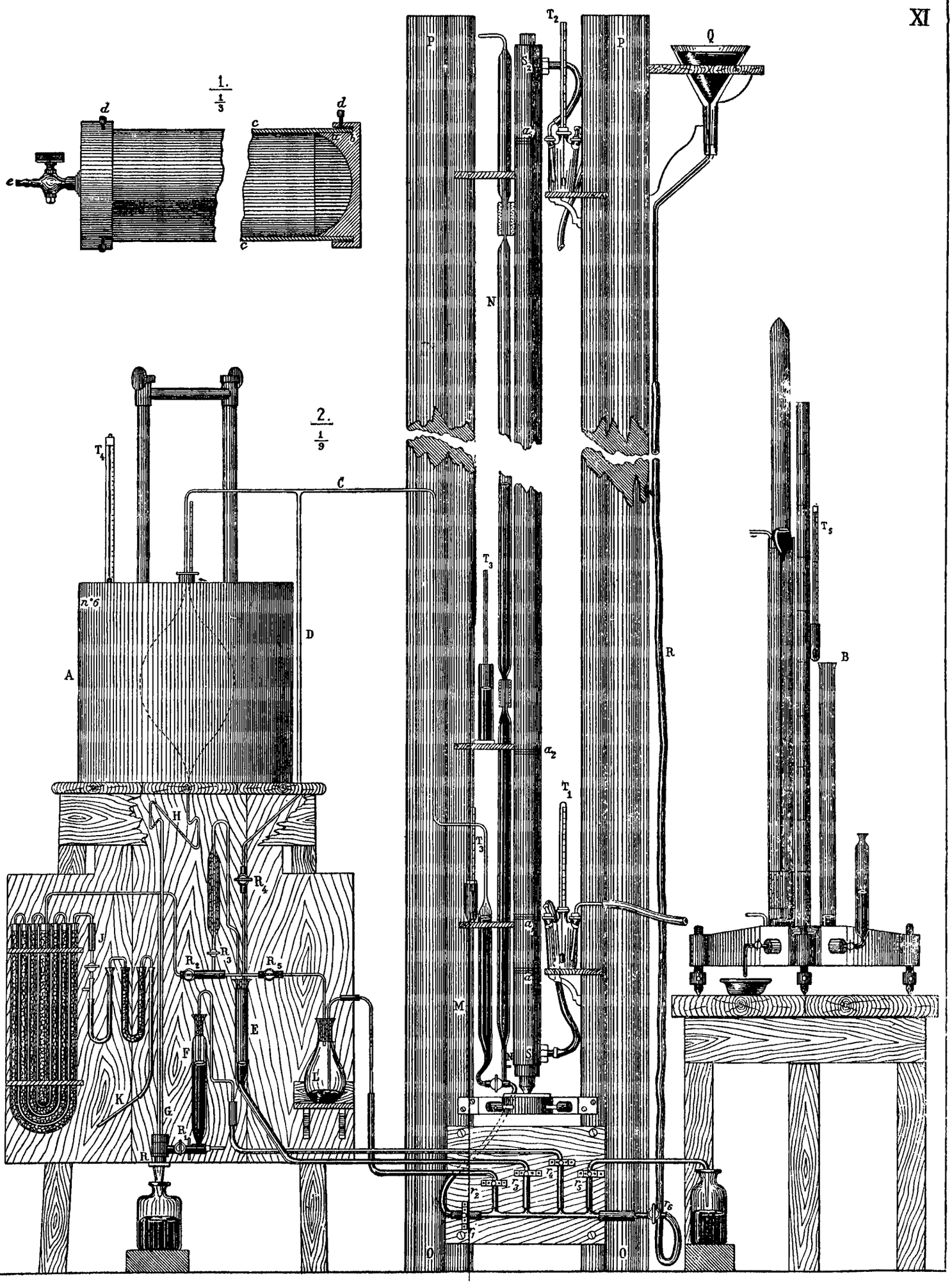

4
1/3
a
C
D
b

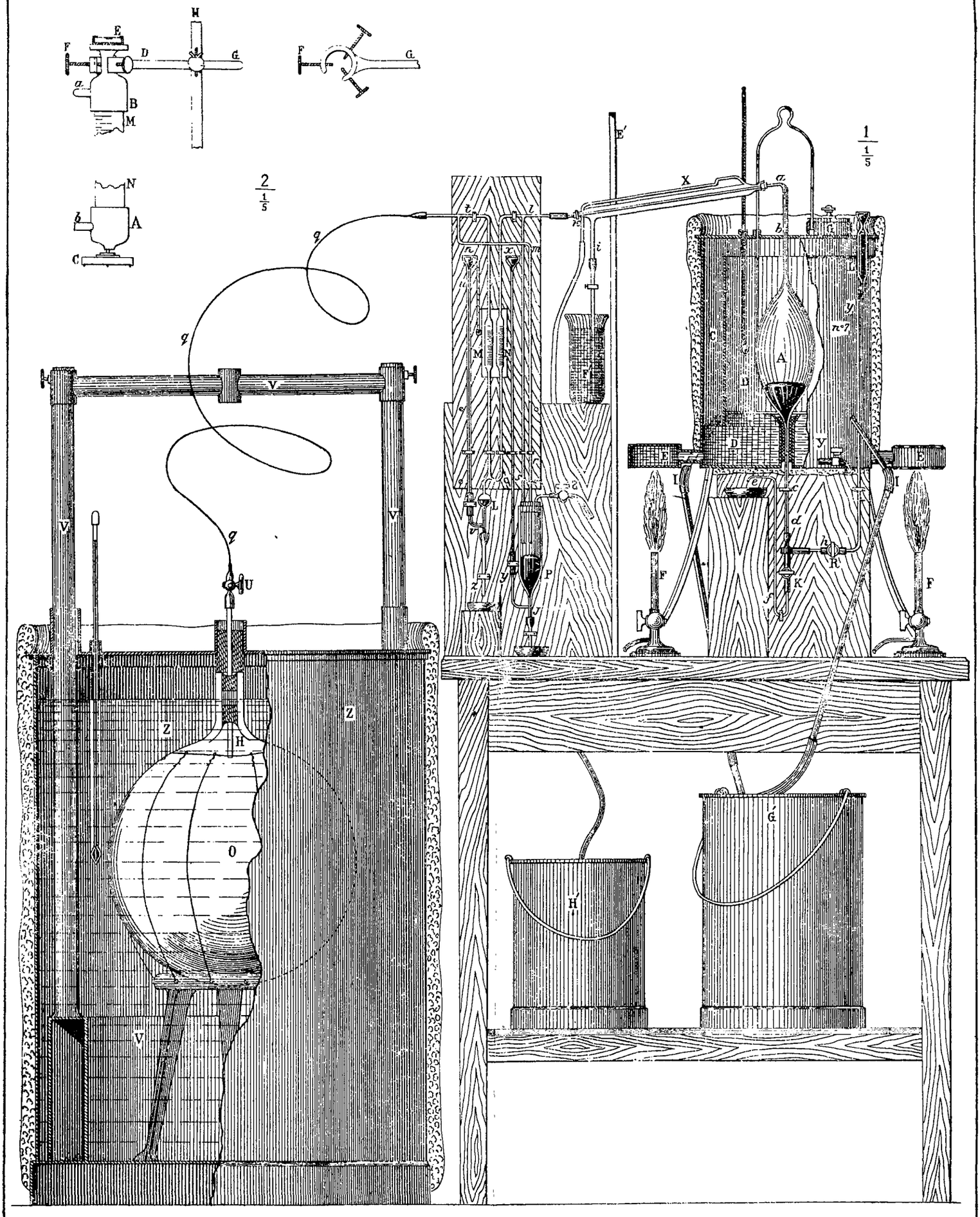

E
B
C
a
D
b
A


3.
1/10
r3
r4
c3
c4
a
b
F
G
A
D


f
r1
r2
c1
c2
a
b
E
d
B
C


1/20
2.
1/5
3.
1/5
4.
1/6
M
B
D
A
C
N
N
T1
T2
j
f
e
G
F
E
H
K1
L


1.
1/3
d
e
c
2.
1/9
T4
C
n°6
D
A
H
R4
J
R2
R3
R5
E
F
K
G
R1
R
L
T2
P
Q
S2
a1
N
T3
a2
T1
a3
a4
M
S
r1
r2
r3
r4
r5
r6
O
T5
B
R


E
F
D
G
H
a
B
M
N
b
A
C
2/5
1/5
q
V
U
Z
O
X
L
M
P
R
K
G
n°7