АКАДЕМИЯ НАУК СОЮЗА СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК

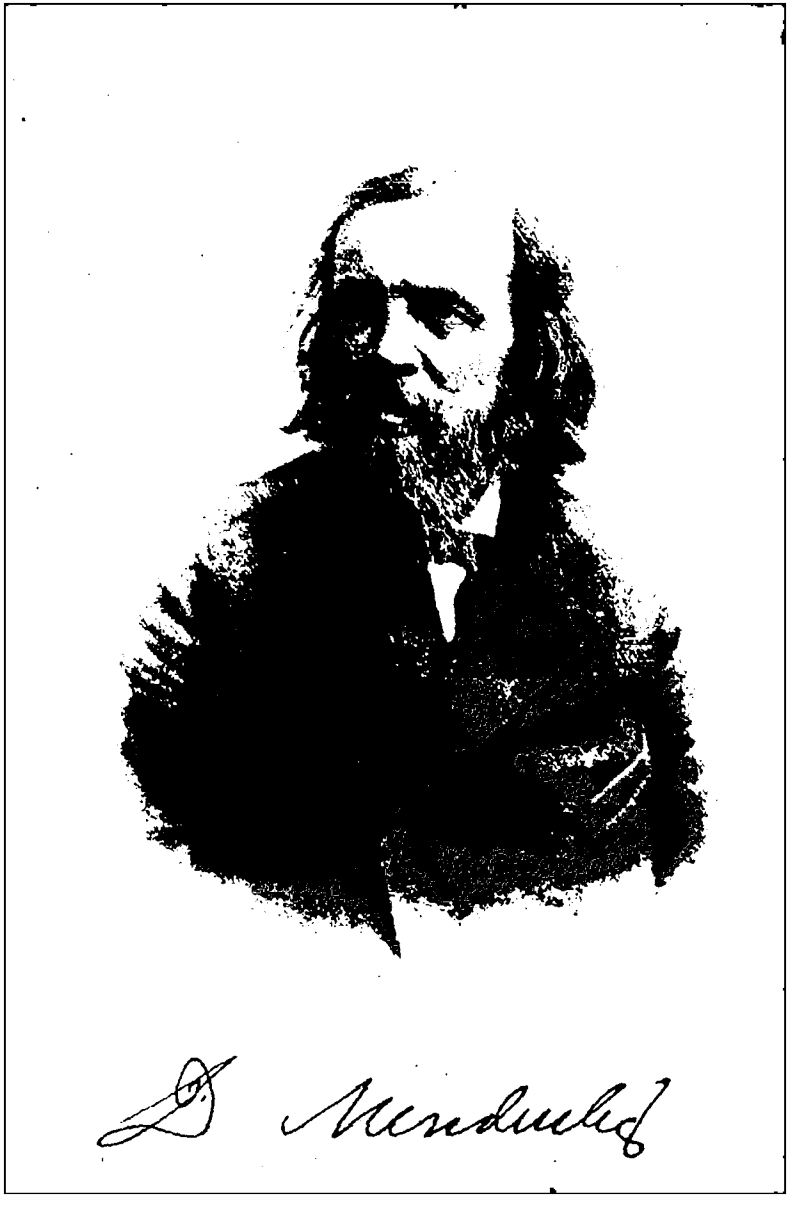
Д. И. МЕНДЕЛЕЕВ

СОЧИНЕНИЯ

т. VII

Под общей редакцией академика В. Г. Хлопина
куратор тома проф. Б. П. Вейнберг

1946
ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР
ЛЕНИНГРАД МОСКВА



Печатается по постановлению
Редакционно-издательского совета
Академии Наук СССР

ГЕОФИЗИКА
И ГИДРОДИНАМИКА

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

От редакции 7

О наблюдениях Беля и о крутильных весах. 9

О логарифмическом декременте качаний 11

О применении манометра для измерения глубины океана[1] 12

О температуре верхних слоев земной атмосферы 15

О температуре высоких слоев атмосферы 23

О температуре верхних слоев воздуха 29

О температуре верхних слоев атмосферы 35

О барометрическом нивелировании и о применении для него высотомера, СПб., 1876 53

О влиянии влажности на барометрическое давление 195

О выражении годовых изменений температуры воздуха 197

Предисловие и примечание к книге Мона „Метеорология или учение о погоде". (1876 г.) 201

О температурах атмосферных слоев 241

Еще несколько слов о температуре атмосферных слоев 273

О втором международном метеорологическом конгрессе в Риме . . 279

О сопротивлении жидкостей 283

О сопротивлении жидкостей и о воздухоплавании СПб., 1880 291

Вычисление меры сопротивления жидкости 463

Результаты опытов над определением сопротивления трения воды о равномерно движущуюся цилиндрическую поверхность 465

О полете на аэростате из города Клина во время солнечного затмения 7/19 августа 467

Воздушный полет из Клина во время затмения 471

Стр.

Предисловие к брошюре В. В. Котова „Самолеты-аэропланы, парящие в воздухе“ 549

Опытное исследование колебания весов и возобновление прототипа или основной образцовой русской меры массы в 1893—1898 гг. 555

О колебании весов 577

Магнитные измерения, произведенные при поездке на Урал в 1899 г. . . 595

Подготовка к определению абсолютного напряжения тяжести. 600

ОТ РЕДАКЦИИ

В настоящем томе объединены труды Д. И. Менделеева, относящиеся к различным вопросам геофизики и использования атмосферы и гидросферы для передвижения по ним, а именно к гравитации („О наблюдениях Беля и крутильных весах", „О логарифмическом декременте качания" и отчасти „О колебании весов", „Подготовка к определению абсолютного напряжения тяжести"), океанографии („О применении манометра для измерения глубины океана"), метеорологии и аэрологии („О температуре верхних слоев земной атмосферы", „О температуре высоких слоев атмосферы", „О температуре верхних слоев воздуха — теория тепла", „О температуре верхних слоев атмосферы", „О барометрическом нивелировании и применении для него высотомера", „О выражении годовых изменений температуры воздуха", предисловие и примечания к книге Мона „Метеорология или учение о погоде", „О температурах атмосферных слоев", „Еще несколько слов о температуре атмосферных слоев", „О втором международном метеорологическом конгрессе в Риме"), гидродинамике — главным образом в связи с воздухоплаванием („О сопротивлении жидкостей", „О сопротивлении жидкостей и о воздухоплавании", „Вычисление меры сопротивления жидкости k", „Результаты опытов над определением сопротивления трения воды о равномерно движущуюся цилиндрическую поверхность", „Опытное исследование колебания весов и возобновление прототипа или основной образцовой русской меры массы в 1893—1898 гг.", „О колебании весов"), воздухоплаванию („О сопротивлении жидкостей и о воздухоплавании", „О полете на аэростате из города Клина во время солнечного затмения 7/19 августа", „Воздушный полет из Клина во время затмения",

предисловие к брошюре В. Котова „Самолеты - аэропланы, парящие в воздухе") и земному магнетизму (вступительные замечания к II главе части III книги „Уральская железная промышленность 1899 г.").

Ввиду такого разнообразия тем этих трудов Д. И. Менделеева настоящему тому условно придано сокращенное наименование „Геофизика и гидродинамика".

В начале ряда работ помещены выписки-замечания Д. И. Менделеева из „списка моих сочинений" (Литературное наследство, т. I, 1939 г.) о причинах написания той или иной работы и времени ее выхода. „...Нумера, подчеркнутые и стоящие слева, относятся к тем статьям, которые я считаю настолько самостоятельными, что могу их признать своими! Два и три раза подчеркнуто то, что я считаю более важным".

Журнал Русского Химического Общества и Физического Общества, 1873 г., т. V, отд., I. вып. I, стр. 15—16.

ВЫПИСКА

из протокола заседания Физического Общества

12 октября 1872 г.

5) Менделеев обратил внимание членов общества на некоторые особенности результатов обширных наблюдений Беля (1842) над среднею плотностью земли, произведенных крутильными весами по способу Мичеля и Кавендиша. Как в среднем результате, так и в выводе отдельных серий, при прочих равных обстоятельствах и введя все поправки, какие предложены Эри, получается плотность земли меньшая для случая употребления свинцовых шаров, чем тогда, когда взяты шары цинковые или стеклянные, притом общий средний результат у Беля (5.67) больше, чем у Кавендиша и Рейха (5.44). Поэтому Менделеев выразил желание, чтобы были вновь проверены способы расчета результатов, получаемых крутильными весами, и обратил особое внимание: 1) на необходимость ближайшего уяснения причин наблюдаемого различия времен колебания при одних и тех же статических обстоятельствах, 2) на необходимость принять во внимание начальную скорость при приближение массы и 3) на способ нахождения среднего положения коромысла под влиянием массы по его крайним положениям. Если же новый разбор имеющихся данных не объяснит замеченных разноречий в результатах Беля, то необходимо предпринять новые опыты с крутильными весами, чтобы при их помощи опытным путем проверить Ньютоновы законы на малых расстояниях и для тел разных по химическому составу и массе; законы эти признают до сих пор справедливыми на малых расстояниях и для всех тел, что и принимается при расчете результатов, но на это до сих пор нет еще опытной проверки. При таких новых опытах возможно уменьшить число и свойство поправок, заменив тяжелое коромысло, употребленное Белем для движения масс, кругом, притягательное влияние которого при всех положениях будет одно и то же. Сверх того, по мнению г. Менделеева, необходимо было бы опыты этого рода произвести в безвоздушном про-

странстве, чтобы избежать весьма вредного влияния воздуха и в особенности его движений; при этом хотя и явятся технические трудности, но зато должно ждать результатов наиболее между собою согласных. До тех пор, пока не объяснены разноречия в опытных данных Беля при замене свинцовых шаров другими, по мнению г. Менделеева, есть повод сомневаться в полной применяемости закона Ньютона для разных тел на близких расстояниях и его можно считать предельным законом, точным только на значительных расстояниях. Для доказательства или опровержения этого возможного допущения желательны новые опыты, тем более, что вопрос касается соотношения между всеобщим тяготением, одинаковым для всех тел, и химическим притяжением, различным для разных тел, но действующим только на неизмеримо малых расстояниях.

Журнал Русского Химического Общества и Физического Общества 1873 г., т. V, отд. I, вып. 2, стр. 48.

ВЫПИСКА

из протокола заседания Физического Общества

6 ноября 1872 г.

8) Г. Менделеев сообщил, что, по его наблюдениям, логарифмический декремент качаний тяжелого тела, повешенного на проволоке, непостоянен; вместо известного выражения амплитуды уменьшающихся размахов г. Менделеев предлагает другую, по его мнению, более удовлетворительную формулу.

Журнал Русского Химического Общества и Физического Общества 1874 г., т. VI, часть физ., отд. 1, вып. 6, стр. 106—107.

ВЫПИСКА

из протокола 19-го заседания Физического Общества

7 мая 1874 г.

8) Д. И. Менделеев делает замечание о том, что для определения больших глубин в океанах надежнее всего употреблять манометры, конечно сверенные со ртутными, потому что показания их не зависят от изменения положения корабля. Употребляя для опускания канат с телеграфною проволокою, при надлежащем устройстве можно знать в каждый момент глубину, на которой находится опускаемый манометр. Достижение дна узнается тогда прекращением в изменении давлений при выпускании каната. Манометр до 500—700 атм. достаточен для всех промеряемых мест океана.

Вопрос этот очень меня занимает.
1875 От связи с высшими разрежен-
ных разреженных газов, а они не-
пременно ведут к вопросу о природе
светового эфира. Кое что я изучил
давно, но не публиковал. Может быть
я стану заниматься [illegible]
эфира — со[illegible] сред.
Всё напоминает о генетической связи,

Это развитие № 87. Напечатано в
1876 [illegible] [illegible], а для [illegible] [illegible]
[illegible] по-[illegible] — в Женеву.

Это отдельный оттиск № 87. Я [illegible] [illegible] [illegible]
1876 [illegible], так как на многие [illegible] [illegible] [illegible]
[illegible] — [illegible] [illegible] [illegible] [illegible]
[illegible] [illegible].

87 О температуре верхних слоев атмосферы. Протокол физико-химич. общества. Журн. 1875 (см. [illegible]).
1012/8
См. № 223.

88 De la température des couches supérieures de l'atmosphère. Archives des sciences physiques et naturelles - Genève 1876 p. 233
1012/9

89 О температуре верхних слоев атмосферы (отдельно [illegible] [illegible]) Зап. русс. [illegible] [illegible]. 1876 [illegible].
1012/10

1875. Вопрос этот очень меня занимал. Он связан с моими работами над разреженными газами, а они направлялись к вопросу о природе светового эфира. Кое-что я и тут делал, но не публиковал. Тогда-то я стал заниматься воздухоплаванием. Отсюда — сопротивлением среды. Все находится в генетической связи.

87. О температуре верхних слоев атмосферы. Проток[ол] физического общества [от] 7 окт[ября] 1875 [г.]. См. № 223 1012/8.

Журнал Русского Химического Общества и Физического Общества 1885 г., т. VII, часть физ., отд. 1, вып. 8, стр. 260—265.

ВЫПИСКА

из протокола 30-го заседания Физического Общества

7 октября 1875 г.

2) Д. И. Менделеев сообщил *о температуре верхних слоев земной атмосферы.* Под именем верхних слоев должно подразумевать те, которые не только возвышены над уровнем океана, но и частью удалены от земной поверхности. Слои атмосферы, находящиеся близ земной поверхности, сильно подчинены ее влиянию, а потому изменяют с нею температуру, оттого наблюдения в горах дают изменчивый, индивидуальный результат, как видно ясно по исследованиям над границею вечного снега. Разность температур двух мест у подошвы и вершины горы зависит несомненно от того, есть или нет снег в обоих местах, или снег только на вершине. Таяние снега понижает температуру земли, а следовательно и воздуха, близ нее находящегося. Данные С. Бернарда это ясно показывают. В низких слоях атмосферы, кроме того, абсолютное количество водяного пара сильно меняется, а при этом должна сильно изменяться и температура воздуха. По этим причинам, для отыскания закона изменения температур воздуха на разных высотах преимущественно пригодны наблюдения, сделанные в свободном воздухе, на аэростатах, в некотором удалении от земной поверхности и, по возможности, при отсутствии облаков, дождя и т. п. Они действуют как экраны, уединяя часть слоев от других, и как источники тепла или холода, ибо в них происходит перемена состояния воды, сопровождающаяся выделением или поглощением теплоты. В таких верхних слоях атмосферы должно ждать правильного распределения тепла, если изъять те слои, где от теплого или холодного ветра температура изменена. Закон изменения температур для покойного и чистого воздуха стремились теоретически определить многие геометры, астрономы и физики, как Лаплас, Пуассон, Айвори, Аткинсон, Био, Бессель, Ковальский и др., но сложность явления ставит тому препят-

ствия; непригодно то предложение, что воздух вполне теплопрозрачен: заключая водяной пар, он лишается этого свойства (Тиндаль). Принятие же гипотезы о теплопрозрачности воздуха не устраняет трудностей задачи, ибо слои воздуха, получившие теплоту от земной поверхности, при своем поднятии не только расширяются от уменьшающегося давления, но несомненно производят и другие виды работы, выделяя влагу в облака и перемещаясь. Оттого-то с давних пор вопрос этот слабо подчинялся физико-математическому анализу. Необходимо начать с индукции, а именно с изучения аэростатических наблюдений, рефракции и гипсометрических определений высот. Одни аэростаты могут дать результат, свободный от всяких гипотез, *если сравнить изменения давлений с изменениями температур* в разных слоях атмосферы. До сих пор при разборе аэростатических наблюдений, обыкновенно, сравнивали температуры с высотами, но при таком сравнении уже включаются в решение задачи гипотезы, лежащие в основании гипсометрических формул (неподвижность воздуха, точность мариоттрва закона и закон изменения температур). Собранный до сих пор на аэростатах материал не обширен. Первые наблюдатели, конца прошлого и начала нынешнего столетия (Шарль, Гарнерин, Робертсон, Захаров, Цамбекари, Гей-Люссак), сделали только отрывочные наблюдения и их запас данных малочислен. Восхождения Барраля и Биксио были совершены в очень неблагоприятных атмосферных и аэростатических условиях. Только данные, собранные Вельнем и особенно Глешером в Англии могут подлежать разбору, ибо число наблюдений велико и качество удовлетворяет условиям точности. Но однако даже у Глешера есть неустраненные, постоянные, вредные влияния, особенно же два следующих: 1) термометр помещался в лодке между наблюдателем и аэронавтом, а потому, вероятно, особенно в высших слоях, давал температуру *бо́льшую, чем действительная*; 2) аэростат Глешера не мог оставаться в верхних слоях, был для того мал и тяжел, а попадал в верхние слои, несомненно, только вследствие приобретенной внизу скорости, а потому должен был и скоро подниматься и быстро падать, а в таких условиях нельзя ручаться за правильность термометрических указаний, среднее *должно быть выше действительности.* Тем не менее запас Глешера драгоценен по числу собранных данных и по высоте сделанных восхождений. Должно сожалеть поэтому, что Глешер в обработку его включил гипотезу, взяв средние из разностей температур на разных высотах, полученные при разных обстоятельствах. Такие средние числа брать не должно, потому что *несомненна зависимость разности температур, при постоянной разности уровней, от начальной температуры.* Это отлично видно из данных Глешера и выво-

дится из метеорологических наблюдений (Кемц, Савич и др.). Так как высоты разных восхождений Глешера были неодинаковы и исходные пункты имели разные температуры, то средний вывод может значительно меняться после каждого нового восхождения, как это и видно в самом деле в средних, выведенных Глешером в 1862, 1863 и 1864 годах. Оттого этими средними выводами Глешера пользоваться не должно, необходимо брать его подлинные числа.

Взяв такие числа и исключая те слои, в которых дул теплый ветер (преимущественно соответственный Гольфстрему) или были быстрые переходы от облаков и тумана к чистому пространству, соединяя притом показания, полученные при восхождении и спуске, г. Менделеев нашел в пределах точности, возможной в аэростатических наблюдениях, что *приращения температур* (t) *пропорциональны приращениям давлений* (H) в каждом восхождении, т. е.

$$\frac{d(t)}{d(H)} = \text{const.}$$

Отсюда следует, что если в данное время, на некоторой вертикальной линии, в атмосфере были: температура t_0 и давление H_0, то в то же время в спокойной и чистой атмосфере, на той же вертикали, если на некоторой высоте будет давление H_i, то там будет температура:

$$t_i = C + H_i \frac{t_0 - C}{H_0},$$

где C есть постоянная величина, а $\text{const.} = \frac{t_i - C}{H_i}$. Для примера г. Менделеев указал на два из высших восхождений Глешера: 5 сентября 1862 г., когда достигнут был слой, где давление менее 10″, и 31 марта 1863 г., когда меньшее давление было 12.″4, и на два из невысоких восхождений: 30 июля 1862 г. и 9 октября 1863 г., где давление падало до 23.″4 и 22.″5. Взяв средние из нескольких соседних наблюдений одного восхождения и устраняя чрез то влияние мелких погрешностей, чрез интерполирование, выводится, для четырех упомянутых восхождений:

$$C = -32.^\circ 9,\quad -29.^\circ 2;\quad -31.^\circ 7,\quad -33.^\circ 0\ \text{Ф}.$$

Общее среднее для лучших данных Глешера есть $C = -32.^\circ 5$ Ф. Так как, судя по предшествующему, $C = \frac{t_i H_0 - t_0 H_i}{H_0 - H_i}$, а потому

погрешность $\Delta(C)$ в C, в зависимости от погрешностей $\Delta(t)$ и $\Delta(H)$ температуры и давления, будет

$$\Delta(C)=\pm\left[\frac{t_0+t_1-2C}{H_0-H_1}\right];\quad \Delta(H)\pm\left[\frac{H_0+H_1}{H_0-H_1}\right]\Delta(t),$$

то в отдельном определении[1] C можно ждать значительных разностей, устраняющихся в среднем, а потому *можно думать, что C есть величина постоянная во всех случаях*, в разные времена года. Тогда физическое значение этого числа очевидно: оно показывает температуру того слоя атмосферы, где давление *близко* к нулевому. Однако эмпирическому выводу из данных Глешера $C=-32.°5$ Ф. $=-36°$ Ц. $=-29°$ Р. нельзя доверять в его абсолютной мере,[2] потому что, как указано выше, все числа Глешера можно считать выше действительности, хотя в пределах возможных погрешностей данные Глешера дают одно и то же число. Наблюдения близ земной поверхности, в горах, дают при обработке по вышеописанному способу обыкновенно число C ниже, чем $-36°$ Ц. Так, из наблюдений Бауэрнфейнда в Баварии получается среднее $C=-31.°6$ Р. Данные Плантамура для Женевы и С. Бернара дают $C=-39.°2$ Ц., если взята 10-летняя сложность, если же взято 30-летнее среднее, то $C=-39.°9$ Ц.; вводя поправку на разность широты и долготы, получается около $-42°$; средние для июля и августа, когда на С. Бернаре почти нет снега, дают $C=-36°$; декабрь и январь, когда снег бывает и в Женеве, дают $-37.°7$ Ц.; десятилетние наблюдения на Шомоне и в Невшателе (разность высот 664 м) дают $C=-36.°4$ Ц. и т. д. Наблюдения аэронавтические Шарля и Гей-Люссака в Париже, Захарова в С.-Петербурге (1804 г.) и Робертсона в Гамбурге так же, как и наблюдения в горах, *не противоречат* предположению о постоянстве величины C, но по недостаточности данных или вследствие влияния почвы не дают возможности определить C с точностью и узнать, изменяется ли его значение с географическою широтою и долготою, с временами дня и года.

Считая C постоянным во всех ли случаях, или только для данного места и времени и для ясной погоды, получается эмпирический весьма простой закон для изменения температур в разных слоях атмосферы и легко приложить этот закон к изучению множества явлений, в атмосфере происходящих.

---

[1] Напр., если $t_0=60°$, $t_1=30°$; $H_1=20''$, если $\Delta(H)=0.''05$, $\Delta(t)°=2°$ Ф, что возможно в отдельном опыте, то $(C)=\pm 10°.7$ Ф.

[2] Тем более, что известны случаи низшей температуры воздуха близ полюсов холода. Существование этих низких температур в полярных странах, однако, не может говорить противу точности данных Глешера и вывода из них, потому что нельзя утверждать, что C постоянно при всех широтах и даже можно думать, что оно, хотя немного, с широтами меняется, ибо понятие о постоянной температуре небесного пространства есть фикция и так как близ нулевого давления могут быть иные перемены температур.

Важное значение закона изменения температур высших слоев воздуха для метеорологии,[1] для астрономии и для космографии заставляет желать накопления нового материала при помощи аэростатических наблюдений. При этом особенно настоятельны: восхождения в ясную погоду, днем и ночью, соединенные с определением рефракции, восхождения на разных частях земной поверхности и восхождения зимою при значительном холоде, когда можно по эмпирическому закону ждать малой убыли температуры при поднятиях. Россия, с ее континентальными условиями, очень выгодна для наблюдений этого рода, как то было уже однажды заявлено на съезде русских естествоиспытателей. По этому поводу г. Менделеев счел не бесполезным изложить свои предположения об организации аэростатических наблюдений в России, хотя для того и требуются значительные средства, а именно для 20—15 восхождений в высшие слои атмосферы не менее 30 000 рублей. Для достижения высших слоев атмосферы г. Менделеев предложил прикреплять к аэростату герметически закрытый, оплетенный, упругий прибор для помещения наблюдателя, который тогда будет обеспечен сжатым воздухом и может безопасно для себя делать определения и управлять шаром. Этому последнему необходимо придать возможно бо́льшие размеры, от 2 до 3 тыс. куб. м, чтобы можно было оставаться в высших слоях атмосферы по желанию и взять много балласта. Наполнение необходимо водородом. Наиболее приличная для аэростата форма, повидимому, есть двойной конус, потому что тогда техническое выполнение непроницаемости может быть лу́чше достигнуто и число швов уменьшится. Необходимо также устроить возможно чувствительные металлические термометры и легкие переносные регистрирующие приборы для записи времени, давления, температуры и влажности. Проектированный г. Менделеевым такой прибор содержит металлические барометр и термометры двойного действия, причем устраняется влияние возможных перемещений частей прибора друг по отношению к другу, ибо отчет производится по рас-

---

[1] Можно поправлять данные температуры на высоту места над уровнем моря, как это делается для давлений. Считая гипсометрическую формулу справедливою во всех случаях, можно по предшествующему вывести, что изменение в 1° Ц. отвечает поднятию $= \frac{8\,000\,(1+\alpha t)}{t-C}$, а потому, зная высоту, отвечающую 1° Ц., можно определить C. Гумбольдт для тропических стран нашел высоту эту, в разных случаях изменяющуюся от 250 до 180 м, откуда для этих стран C изменяется от $-30.°1$ до $-20°$ Ц., так как $t =$ от 20 до 15° Ц. Можно думать поэтому, что C на экваторе выше, чем у полюсов, хотя и отличается незначительно. При постоянном C высоты на 1° должны возрастать при понижении t (ибо $-C < 273$), как это и видно из данных Соссюра, Шлагдинвейта и др.

стоянию двух подвижных указателей. Устройство такого прибора дает возможность производить наблюдения в атмосфере без участия наблюдателя, а потому в низких слоях атмосферы можно делать наблюдения при помощи легких привязанных (captif) аэростатов, а в верхних—при помощи пускания таких аэростатов с прибором, которого запись может быть прочтена, если пущенный аэростат будет найден, что предлагал Чебышев. Легко устроить, чтобы при этом аэростат улетел недалеко от места спуска.

1875. См. № 87.

223. Sur la température des couches élevés de l'atmosphère. „Comptes rendus", 1875.

Comptes rendus hébdomadaires des séances de l'Académie des sciences, Paris, 81, No. 24; 1094—1096 и 1182—1184, 1875. (Перевод Б. Н. Вейнберга).

О ТЕМПЕРАТУРЕ ВЫСОКИХ СЛОЕВ АТМОСФЕРЫ

ЗАМЕТКА г. Д. МЕНДЕЛЕЕВА

(Члены комиссии: гг. Буссенго, Эдм. Беккерель, Фай)

Большое число атмосферических явлений зависит главным образом от разности температур слоев воздуха; поэтому исследование эмпирических и теоретических законов изменений температуры с высотой привлекало издавна внимание ряда ученых. Тем не менее самая теория этого вопроса до настоящего времени довольно несовершенна.

Теория изменения температуры в слоях атмосферы опирается на то предположение, что верхние слои получают теплоту только от нижнего слоя, нагреваемого землею; верхние слои охладились бы, следовательно, при расширении вследствие уменьшения давления. Такое предположение включает неявным образом другое, а именно, что воздух теплопрозрачен. Для этого случая Пуассон доказал, что между начальной[1] температурой t_0 и окончательной температурой t_1, когда давление изменяется от H_0 до H_1,[2] [существует] зависимость

$$\frac{1+\alpha t_0}{1+\alpha t_1} = \left(\frac{H_0}{H_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}, \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

где k есть отношение двух теплоемкостей, равное 1.41. Эту формулу, согласную с опытами и опирающуюся на механическую теорию теплоты, следовало бы, если бы предыдущая гипотеза была правильной, иметь возможность прилагать к определению

---

[1] В оригинале очевидная опечатка: „finale" вместо „initiale" *(Прим. перев.)*

[2] На первый взгляд можно думать, что при вычислении температуры верхних слоев нужно было бы принимать во внимание не только теплоту, затрачиваемую на расширение, вызываемое уменьшением давления, но также ту, которая эквивалентна работе поднятия: понижение температуры было бы таким образом удвоено. Это было бы ошибкой; ибо, в то время как некоторая масса воздуха поднимается, другая равная масса опускается, без чего равновесие воздуха не имело бы места: это особенно становится ясным, когда рассматривают, как это делается теперь, молекулы газа обладающими собственным движением, которое является причиной диффузии и т. д.

температур t_1 слоев атмосферы, когда заданы t_0, H_0 и H_1. Однако она приводит к температурам, слишком низким. Так, принимая $H_0 = 750$ мм, $t_0 = +15°$:

для	$H_1 =$	650	550	450 мм
находим	$t_1 =$	$+3.°3$	$-9.°8$	$-24.°8$

между тем как наблюдения г. Глешера (Report of the British Association, 1862—1864) дали для той же начальной температуры и для тех же давлений:

При подъеме 5 сентября 1862 г.	$+8.°2$	$+1.°4$	$-5.°4$
Средние из нескольких наблюдений на аэростате: при ясном небе	$+5.6$	-1.3	-7.6
Средние из нескольких наблюдений на аэростате: при закрытом небе . . .	$+7.0$	$+0.2$	-6.2

Наблюдения в горах привели к подобным же результатам. Г. Плантамур дает для Женевы годовые средние $t_0 = 9.°21$, $H_0 = 726.6$ мм; для С. Бернара, где $H_1 = 563.9$, средняя годовая температура t_1, вычисленная при помощи соотношения (1), была бы $-10.°8$, тогда как наблюденная температура есть $-1.°76$. Формула (1), комбинированная с гипсометрической формулой, приводит к тому предположению, что, каковы бы ни были H_0 и t_0, понижение на 1 градус в температуре должно соответствовать поднятию z на 101.2 м,[1] т. е. [что] $\frac{dz}{dt} = -101.2$ м; а между тем в Альпах температура падает на 1° только при подъеме на 150 м летом и на 300 м зимой. Гумбольдт, г. Буссенго и другие нашли, что под тропиками понижению температуры на 1 градус соответствует подъем на 170—250 м.

Все же вне сомнения, что $\frac{dz}{dt}$ есть функция начальных температуры и давления, но не постоянная, как это указывается формулой (1).

Так как результаты, к которым приводит эта формула, весьма отличны от тех, какие дает наблюдение, то для практических приложений и особенно для вычисления астрономических рефракций прибегали к различным интерполяционным формулам с одной или несколькими постоянными, вычисленными из наблюдений, сделанных в верхних слоях (Лаплас, Айвори, Кемтц, Бауернфейнд, Ковальский и т. д.). С другой стороны, желали находить причину различия между температурами, вычисленными по соотношению (1), и температурами, наблюденными в более совершенной прозрачности верхних слоев, — в поглощении части солнечной теплоты

[1] Формула (1) дает $dH = \frac{a}{1+at} \frac{H}{0.291} dt$; дифференциальное уравнение, приводящее к гипсометрической формуле, есть $dH = -\frac{H}{7993} \frac{dz}{1+at}$ (для широты 45°); откуда $\frac{dz}{dt} = -\frac{7993a}{0.291} = -101.2$, если величина z есть высота, выраженная в метрах.

воздушными слоями и т. д. Эти гипотезы неосновательны, результаты их не могут быть подвергнуты вычислению; можно поэтому обойтись без них.

Сравнивая данные наблюдения с данными по формуле (1), видим, что в верхних слоях атмосферы существует источник теплоты, ибо наблюденные температуры постоянно выше, чем вычисленные. Этот источник теплоты находится, без сомнения, в водяных парах атмосферы. Два аргумента, которые будут развиты во второй заметке, говорят в пользу этого утверждения.

ВТОРАЯ ЗАМЕТКА г. Д. МЕНДЕЛЕЕВА

(Члены комиссии: гг. Буссенго, Эдм. Беккерель, Фай)

Верхние слои воздуха всегда относительно менее богаты водяными парами, чем нижние. По закону Дальтона, относящемуся к смесям газов или паров, если давление смеси внизу есть H_0 и парциальное давление одной из составляющих жидкостей (fluides) относительной плотности Δ есть f_0, то парциальное давление той же жидкости на высоте, где общее давление станет равным H_1, должно быть приблизительно

$$f_1 = f_0 \frac{H_1 + nH_0}{H_0 + nH_1},$$

где

$$n = \frac{1-\Delta}{1+\Delta}$$ [1]

---

[1] Дифференциальное гипсометрическое уравнение надо применять отдельно к каждому из газов, составляющих смесь, т. е. к сухому воздуху и к пару воды. Следовательно —

$$dz = \frac{\text{const}\cdot(1+\alpha t)}{H}\, dH = \frac{\text{const}\cdot(1+\alpha t)}{f}\, df,$$

откуда, интегрируя между пределами H_0, H_1 (давления сухого воздуха, которые почти равны давлениям влажного воздуха) и f_0, f_1 (давления паров воды), видим, что

$$\ln\frac{f_0^*}{f_1} = \Delta \ln \frac{H_0}{H_1}$$

или, весьма приближенно,

$$\frac{\Delta(H_0 - H_1)}{H_0 + H_1} = \frac{f_0 - f_1}{f_0 + f_1},$$

таким образом, имеем формулу, которую я только что дал. Так, если бы упругость пара была $f = 10$ мм при давлении $H_0 = 760$, то упругость пара при давлении $H_1 = 380$ была бы $f_1 = 6.6$ ($\Delta = 0.623$), если бы водяной пар был постоянным газом.

* В подлиннике опечатка $\ln = \frac{f_0}{f_1}$. (*Прим. перев.*)

или, по крайней мере,

$$f_1 = f_0 \frac{H_1}{H_0}.$$

В действительности, в атмосфере упругость f_1 пара воды в верхних слоях всегда много ниже, чем

$$f_1 = f_0 \frac{H_1}{H_0}.$$

Водяные пары нижних слоев должны, следовательно, устремляться в верхние слои, подобно тому как газ, имеющий данную упругость, устремляется в другое пространство, где давление меньше. Теория и опыт показывают, что в этом случае в пространстве имеет место повышение температуры, тогда как в пространстве, первоначально занимавшемся газом, происходит соответствующее охлаждение. Я не настаиваю сильнее на этом первом источнике теплоты, потому что он должен давать, сравнительно со вторым, лишь малое [количество] теплоты. Я рассчитываю вернуться другой раз к этому предмету, так как он объясняет много атмосферических явлений и показывает длительную неустойчивость слоев воздуха.

Водяные пары нижнего слоя, устремляясь вверх и расширяясь, охлаждаются и переходят в жидкое или твердое состояние, освобождая то, что называется скрытой теплотой. Таким путем образуются облака, и мы видим, что главный источник теплоты верхних слоев атмосферы может быть легко подвергнут вычислению.

Для упрощения первого вычисления допустим, что все слои насыщены влагою. Такое допущение вызывало бы для t_1, с одной стороны, вычисленную величину, несколько слишком повышенную, так как полное насыщение нижних слоев бывает редко;[1] с другой стороны, оно вызывало бы для t_1 величину, слишком низкую, так как степень насыщения верхних слоев, хотя и несколько возрастает сначала, но затем уменьшается, как это констатировали аэронавты.[2] Поэтому мы не уклонимся много от действительности, если для упрощения допустим, что f_1 есть функция только одной температуры t_1 и не зависит от давления H_1 или от высоты z_1. Механическая теория теплоты приводит к дифференциальному уравнению [связывающему] прирост dQ теплоты,

---

[1] Г. Плантамур, однако, в 1870 г. видел 193 раза полное насыщение.

[2] Так, г. Глешер (1864) нашел:

На высотах . . .	0	3	5	10	15	20 тыс. англ. фут.
Процент водяного пара	59	71	69	46	44	33 для чистого неба
	74	78	74	48	59	29 для закрытого неба

приобретаемой 1 кг воздуха, прирост $d\tau$ абсолютной температуры $\left(\tau = \frac{1}{\alpha} + t\right)$ и прирост dH давления:

$$dQ = C d\tau - (C - c)\frac{H}{\tau} dH, \quad \ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

где $C = 0.2376$ и $c = 0.1683$ — две удельные теплоемкости воздуха.[1] Если назовем чрез R теплоту, какую выделил бы 1 кг влажного воздуха при конденсации своей влаги, мы таким образом будем иметь dR и dQ, так как

$$dQ = -dR \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

Значение R равно $p \cdot r$, если назовем чрез r скрытую теплоту паров, а именно:

$$r = \begin{cases} 606.5 - 0.7\,t, & \text{если пары переходят в жидкое состояние} \\ 685.7 - 0.2\,t, & \text{„ „ „ „ твердое „} \end{cases}$$

и чрез p вес пара, заключающегося в 1 кг воздуха, а именно:

$$p = \Delta \frac{f}{H - (1 - \Delta) f};$$

или же, так как отношение $\frac{f}{H}$ между упругостью пара и давлением воздуха изменяется лишь незначительно и всегда довольно мало, мы имеем весьма приблизительно:

$$p = 0.629 \frac{f}{H}.$$

Наконец, так как мы допустим, что f есть функция только температуры, мы будем иметь:

$$R = \frac{C\varphi(\tau)}{H} \quad \text{или} \quad \varphi(\tau) = \frac{0.629}{C} f \cdot r,^2$$

$$dR = \frac{C}{H} \cdot \frac{d\varphi(\tau)}{d\tau}\, d\tau - \frac{C\varphi(\tau)}{H^2} dH \quad \ldots\ldots \quad (4)$$

Уравнения (2), (3) и (4) дают:

$$\frac{dH}{d\tau} = \frac{H + \frac{d\varphi(\tau)}{d\tau}}{0.291\,\tau + \frac{\varphi(\tau)}{H}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (5)$$

---

[1] Уравнение (1) выводится из уравнения (2), если предположить $dQ = 0$.

[2] В пределах $-30°$ и $+30°$ мы имеем с достаточной точностью $\varphi\tau = (3.069 + 0.0267\,t)^8$, т. е. $\frac{d\varphi(\tau)}{d\tau} = 0.2136 \cdot (3.069 + 0.0267\,t)^7$.

Значения $\frac{dH}{d\tau}$ дают уменьшение, испытываемое давлением в совершенно влажной атмосфере, когда температура слоя изменяется на 1 градус без поступления тепла извне. Так, например, для $t=+15°$, $H=700$ мм, $\frac{dH}{d\tau}=17.55$ мм;[1] для $t=0°$, $H=400$ мм, $\frac{dH}{d\tau}=9.59$.[2] Мы видим, следовательно, что уравнение (5), не будучи интегрировано,[3] позволяет вычислять температуры t_1 верхних слоев, для которых дано давление H_1, если исходить из начальных данных H_0, t_0. Если взять, как мы сделали в нашем первом примере, $H_0=750$ мм, $t_0=+15°$, тогда:

для	$H_1=$	650	550	450 мм
находим	$t_1=$	$+9.°6$	$+1.°1$	$-7.°7$.

Эти вычисленные температуры весьма приближаются к действительным температурам.

---

[1] Вместо 8.4 по формуле (1), дающей $\frac{dH}{d\tau}=\frac{H}{0.291\,\tau}$.

[2] Вместо 5.1 по формуле (1).

[3] Оно интегрируется рядами.

Журнал Русского Химического Общества и Физического Общества 1875 г., т. VII, часть физ., отд. I, вып. 9, стр. 333[1]—337.

ВЫПИСКА

из протокола 31-го заседания Физического Общества

4 ноября 1875 г.

5. Д. И. Менделеев сообщил следующее о температуре верхних слоев воздуха.

Если допустить, как это общепринято, что верхние слои воздуха получают теплоту только от нижнего слоя, нагреваемого землею, то легко расчесть температурное изменение слоев воздуха, зависящее от перемены давления, основываясь на известном выражении теории тепла:

$$dQ = CdT - (C - c)\frac{T}{H}dH^{2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

и считая приращение тепла $dQ = 0$. Тогда находится зависимость данная Пуассоном, что на той высоте, где давление $= H$, температура будет:

$$T = T_0\left(\frac{H}{H_1}\right)^{k^3}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

где значение $k = \frac{C - c}{C} = 0.291$, если в некотором другом слое

---

[1] По ошибке страница 333 помечена в журнале вторично числом 327. (*Прим. ред.*).

[2] Здесь T суть температуры от $-\frac{1}{\alpha}$, следовательно $T = 271.4 + t$, C и c суть теплоемкости, H — давления, Q — количества тепла, передаваемые 1-му килограмму газа.

[3] Отсюда выводится, что на каждые 101.2 м температура изменяется в столбе воздуха на 1°Ц. Нередко, при первом знакомстве с вопросом полагают, что в расчет должно принять затрату работы (и следовательно тепла) на поднятие от одного слоя в другой, но так как вместе с поднятием соединено падение соответственного количества воздуха (иначе не было бы равновесия), то в результате от этого нет изменения температуры; это становится очевидным, руководствуясь гипотезою о самостоятельном движении газовых частиц. Чрез данную горизонтальную плоскость сверху идет столько же частиц в данное время, сколько идет их снизу. Иначе не было бы равновесия. Идущие снизу частицы, придя в область меньшего давления, — удаляются друг от друга, на это расходуется теплота — оттого поверх плоскости будет низшая температура, чем под нею. Частицы холодного газа, идущие сверху вниз, сближаются, сдавливаются, оттого нагреваются.

(напр. нижнем) при давлении $=H_0$ температура $=T_0$. Такой способ рассуждения дает температуры гораздо ниже действительных. Напр., если $H_0=750$, $t_0=+15°$ Ц., то:

При давлении	$H=$	650	550	450 мм
По (2) температура	$t=$	$+3.°3$	$-9.°8$	$-24.°8$ Ц.,

а по данным Глешера в этих условиях температуры наблюдения суть:

Восхождение 5 сентября 1862 г.	$+8.°2$	$+1.°4$	$-5.°4$ Ц.
Средние для ясной погоды	$+5.°6$	$-1.°3$	$-7.°6$
Средние для облачной погоды	$+7.°0$	$+0.°2$	$-6.°2$

По средней годовой температуре ($+9.°21$) и по давлениям в Женеве (726.6) и на С. Бернаре (563.9) по (2) рассчитывается для С. Бернара $t=-10.°79$, а в действительности там средняя годовая $t=-1.°76$ Ц.

До сих пор еще не объяснили причины такого большого различия расчета от действительности, хотя по важности предмета многократно разбирали его теорию. В применениях нередко для k в (2) давали иное значение (напр. Бауернфейнд $k=\frac{1}{6}$) или применяли иные формулы, с одними или несколькими постоянными, заимствованными из наблюдений, сделанных при поднятии в атмосфере (Лаплас, Айвори, Ковальский и др.), но такие приемы, доставляющие иногда хорошее средство для интерполирования, не составляют теории предмета, потому что причину различия от (2) не уясняют.

Так как вычисляемые t всегда ниже наблюдаемых, то должно искать причину, возвышающую температуру верхних слоев. Ее искали в прозрачности верхних слоев и в поглощении ими лучей тепла, испускаемых землею, но это сомнительно, расчету не подлежит и если бы существовало, то выразилось бы иными, чем наблюдаемые, переменами в температуре слоев воздуха.

Причину повышения температуры воздуха [противу той, которая рассчитывалась по (2)] составляют находящиеся в воздухе водяные пары. Содержание их или упругость (парциальное давление) f значительно переменяется в разных слоях, ибо часть паров сгущается в жидкое и твердое состояние, причем отделяется тепло. Эта причина, очевидно, подлежит точному расчету.

По закону Дальтона (для диффузии газов), если при H_0 упругость паров воды как газообразного тела $=f_0$, то при разрежении до H упругость паров должна быть: 1) в определенном невысоком сосуде $f=f_0\frac{H}{H_0}$ и 2) в столбе, содержащем влажный воздух на той высоте, где давление $=H$, упругость

$$f=f_0\frac{H+nH_0}{H_0+nH},$$

где

$$n = \frac{1-D}{D+1} = 0.232,$$

а D = плотность водяного пара по отношению к воздуху = 0.623.[1] Так как при меньшем давлении H в верхних слоях воздуха всегда f менее надлежащей величины, то пар нижних слоев стремится в верхние, как газ в пустоту, от этого происходит нагревание верхних слоев, которое однако гораздо меньше производимого сгущением пара в жидкость, а потому на первый раз г. Менделеев рассматривает одну последнюю причину.

Итак, воздух поверхности земли, расширяясь, охлаждается, но он отчасти и нагревается в верхних слоях от того, во-первых, что частицы водяного пара из низших слоев стремятся в верхние, как в пустоту, и от того, во-вторых, что, охлаждаясь, пар дает жидкую или твердую воду облаков.

Для упрощения расчета влияния этой последней причины г. Менделеев допускает временно, что все слои воздуха насыщены парами. Тогда f есть известная функция одной температуры T. Это предположение должно, с одной стороны, дать немного высшую температуру для верхних слоев, чем в действительности, потому что полное насыщение влагою нижнего слоя редко наблюдается,[2] а с другой стороны, оно должно дать немного низшую противу действительности температуру, потому что, начиная с некоторой высоты, слои воздуха становятся относительно суше.[3] Поэтому вышеприведенное предположение должно дать температуру, близкую к действительной, если все другие причины имеют незначительное влияние.

---

[1] Доказательство: $dz = \frac{-N(1+\alpha t)}{D} \frac{}{H} dH$ есть основное дифференциальное уравнение гипсометрической формулы. В нем z—высота в метрах, N—постоянное для воздуха = 8000 (около), D—плотность газа по воздуху, H—упругость. Для водяного пара имеем: $dz = -\frac{N}{D}\frac{1+at}{f} df$, для воздуха $dz = -N\frac{1+at}{H} dH$ откуда $D\frac{dH}{H} = \frac{df}{f}$ или, интегрируя: $D \ln \frac{H_0}{H} = \ln \frac{f_0}{f}$, или почти точно $D\frac{(H_0-H)}{H_0+H} = \frac{f_0-f}{f_0+f}$, что и дает приведенное выражение для f. Оно показывает, что если на поверхности земли упругость пара = 10 мм, то там, где давление воздуха уменьшится вдвое, была бы упругость не 5, а 6.6 мм, если бы водяной пар был настоящий газ.

[2] Однако в Женеве в 1870 г. оно наблюдалось 193 раза.

[3] Так, Глешер из своих восхождений выводит (1864) следующие средние величины относительной влажности (в процентах):

На высоте от земли	0	3	5	10	15	20 тыс. англ. фут.
При ясной погоде влажность	59	71	69	46	44	33%
При облачной погоде влажность	74	78	74	48	59	29%.

На один килограмм влажного воздуха приходится по весу водяного пара:

$$D\frac{f}{H-(1-D)f} \text{ или почти } 0.629\frac{f}{H} \text{ кг.}$$

При температуре t каждый килограмм пара освобождает:

$$q=\begin{cases}606.5-0.7\,t \text{ ед. тепла, если сгущается в жидкость}\\ 685.7-0.2\,t \text{ „ „ „ „ „ снег.}\end{cases}$$

Поэтому количество тепла R, могущее развиваться при сгущении пара, содержащегося в килограмме воздуха:

$$R=\frac{C\varphi(T)}{H}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

где $C\varphi(T)=0.629\,f\cdot q$.

В выражении (1) Q означает количество тепла, поглощаемое одним килограммом воздуха, а так как R есть количество тепла, освобождаемое воздухом, то

$$dQ=-dR,$$

а потому из (1) и (3):

$$-\frac{Cd\varphi(T)}{HdT}\,dT+\frac{C\varphi(T)}{H^2}\,dH=CdT-(C-c)\frac{T}{H}\,dH.$$

Откуда

$$\frac{dH}{dT}=\frac{H+\frac{d\varphi(T)}{dT}}{\frac{C-c}{C}\,T+\frac{\varphi(T)}{H}}. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

Значения (4) показывают, насколько уменьшится давление H при изменении температуры влажного воздуха на 1°. Они найдутся для каждого частного случая для данных (H и T), ибо $\varphi(T)$ вполне известна. Так, напр., при $t=+15°$ $H=700$, $\frac{dH}{dT}=17.55$, при $t=-25°$ $H=700$, $\frac{dH}{dT}=10.87$. Поэтому, исходя из данных $H_0=750$ и $t_0=+15°$, получается для верхних слоев воздуха по (4):

Давление $H=$	650	550	450	мм
Вычисленная температура $t=$	$+9.°0$	$+1.°7$	$-7.°7$	Ц.

Они не многим только отличаются от наблюденных температур (см. выше).

Таким образом, значительная разность наблюдаемой температуры от вычисляемой по формуле Пуассона (2) устраняется, если, основываясь на законах механической теории тепла, принять во внимание осаждение влаги воздуха, а не делать расчет только для сухого воздуха, как то делали до сих пор.

1876. Это развитие № 87. Познакомившись с Маринья-ком ранее, я счел наиболее удобным послать статью ему в Женеву.

88. De la température des couches supérieures de l'atmosphère. „Archives des sciences physiques et naturelles". Genève. 1876, 233.

Bibliothèque Universelle et Revue Suisse. Archives des sciences physiques et naturelles, 55, No. 219, 233—254, 1876. [1] *(Перевод Б. П. Вейнберга)*

О ТЕМПЕРАТУРЕ ВЕРХНИХ СЛОЕВ АТМОСФЕРЫ

(сообщено автором)

Чтобы составить правильное понятие о большом числе метеорологических явлений, чтобы определить преломление света в воздушных средах, чтобы производить гипсометрические измерения и для многих других изысканий, необходимо знать закон изменения температур в различных слоях атмосферы. Неудивительно поэтому, что этим вопросом занималось издавна большое число геометров, астрономов, физиков и географов. Лесли, Лаплас, Пуассон, Айвори, Био, Аткинсон, Ковальский и еще многие другие прилагали усилия к открытию этого закона, исходя из предположения, что первичной причиной всякого изменения температуры от одного атмосферического слоя к другому является разность, существующая между их давлениями. Однако, есть основание думать, что верхние слои получают теплоту не только от нижних слоев, доходящих до почвы, но также и от тепловых лучей, которые проходят сквозь эти слои, потому что, вообще говоря, воздух и особенно воздух влажный не вполне теплопрозрачен. Более того, воздух, согретый соприкосновением с почвою, поднимается чрез атмосферу и расширяется, отлагая часть своей влажности: достигнув верхнего слоя, он распространяется во всех направлениях.

Задача, подлежащая разрешению, далеко не проста и требует знания большого числа законов, которые до сих пор еще совсем не открыты. В особенности по этой причине мы находим так мало согласия в данных, принимаемых различными учеными, и находим их так мало согласными с результатами прямого наблюдения.

---

[1] Та же работа напечатана по-немецки в „Jahresbericht des physikalischen Vereins zu Frankfurt a/M" f. d. Rechnungsjahr 1874- 1875, 51—65, Mai, 1876, с указанием автора: „Д. Менделеев (профессор в С.-Петербурге)", с различием разделения на абзацы (принятого и в приводимом ниже переводе с французского) и с иным указанием срока: „15/27, декабрь, 1875". Из немецкого текста приводятся также некоторые разночтения. (*Прим. ред.*)

Очевидно, в вопросах этого рода опытный путь должен предшествовать пути теоретических выводов.

Если мы допускаем, что воздух охлаждается, проходя в верхние слои, только вследствие его расширения, то было бы не трудно вывести отсюда закон пропорциональности понижений температур от приращений высот. Именно такое предположение выводят часто, но неправильно, из данных, доставляемых наблюдениями температур в горных областях, так же, как и при аэронавтических восхождениях. В том же направлении предпринималось большинство работ, относящихся к метеорологическим наблюдениям в различных частях земного шара. Однако эти наблюдения в гористых странах прежде всего имеют индивидуальный характер.

Гумбольдт доказал это как нельзя более ясно в своем исследовании по вопросу о границе вечных снегов. Условия поглощения и излучения тепла совершенно различны для снежной поверхности, увенчивающей верхушку горы, и для голой поверхности склонов и долин; особенно заметно это различие во время таяния этих снегов.

Вот почему в слоях воздуха, непосредственно соприкасающихся с поверхностью снегов, тепловые явления далеко не имеют той правильности, как в слоях свободного воздуха, более удаленных от земли, хотя бы они, в конце концов, и были на той же высоте над уровнем моря. Отсюда следует, что для того, чтобы найти закон изменения температуры в различных последовательных слоях атмосферы, необходимо лишь с большой осторожностью прибегать к данным метеорологических наблюдений в гористых краях. Когда эти наблюдения абсолютно необходимы, должно позаботиться о том, чтобы производить эти наблюдения только в такую пору года, когда состояние почвы приблизительно одно и то же в различных местах от подножия до вершины горы, выбранной местом наблюдения. Ведущие к получению закона термометрических изменений в последовательных слоях атмосферы рассуждения, основанные на данных наблюдений в горных странах, представляют еще неудобство, [вызываемое] существованием правильных токов теплого и холодного воздуха, возникающих вдоль склонов горы. Их образование зависит всецело от конфигурации места, откуда и виден индивидуальный характер наблюдений в горных странах.

Поэтому, если мы хотим прийти к эмпирическому закону термометрических изменений в слоях атмосферы, мы должны будем основываться почти исключительно на явлениях, наблюденных во время аэростатических восхождений. Со времени первых воздушных путешествий Шарля и графа Замбекка мы видим внимание аэронавтов направленным на термометрические наблюдения; но числовых данных, собранных первыми экспери-

ментаторами,—очень ограниченное количество. Гарнерен и Гласфурд в Англии, Робертсон в Гамбурге, Захаров в С.-Петербурге и Гей-Люссак в Париже доставили в 1803—1804 гг. результаты, уже много более полные; к несчастью они ограничиваются несколькими отрывочными числами. Наблюдения Барраля и Биксио полнее, но их восхождение было сделано в условиях воздухоплавания и метеорологических, слишком неблагоприятных для того, чтобы можно было принять без оговорок те числа, которые они собрали. И только благодаря Британской ассоциации, взявшейся с живым интересом за изучение верхних слоев атмосферы и давшей гг. Вельшу и Глешеру, которых сопровождали аэронавты Грин и Коксуэлл, средства предпринять в промежутках времени с 1850 до 1870 гг. серию восхождений, мы имеем гораздо более полные и более точные данные. Особенно по справедливости заслуживают совершенно особого интереса наблюдения г. Глешера, директора Гринвичской метеорологической обсерватории, как по их многочисленности, так и по высотам, которых он достигал; кроме того они представляют преимущество благодаря тому, что были описаны г. Глешером в отчетах английской ассоциации за годы 1862—1866 с примерной тщательностью.

Тем не менее есть две причины постоянных погрешностей (хотя, весьма вероятно, мало значительных), которые число наблюдений, как бы велико оно ни было, нисколько не уменьшает.[1]

1) Прежде всего, термометр был помещен внутри лодки [аэростата] между наблюдателем и аэронавтом, в результате чего полученные температуры, особенно в высоких областях, оказываются *выше действительных температур*.

2) Аэростат Глешера не мог держаться в очень высоких областях, не будучи ни достаточно большим, ни достаточно легким; если он проникал в крайние слои атмосферы, то это происходило только в силу скорости, приобретенной в нижних слоях. Он должен был подниматься и опускаться очень быстро[2]— условия, делающие невозможною достаточную правильность в показаниях термометра; средняя, полученная таким образом, *должна превосходить среднюю действительных температур*.

Тем не менее числа, полученные г. Глешером, являются очень драгоценными данными и даже единственными в своем роде как по их числу, так и по тщательности, с какою они были собраны. Известно, что г. Глешер открыл, что в слоях, где не дуют ни теплые,

[1] В немецком тексте: „Тем не менее в них заключаются две ошибки, которые сами по себе весьма незначительны, но которыми нельзя пренебрегать по соотношению к числу наблюдений". (*Прим. перев.*)

[2] В немецком тексте: „Поэтому он должен был опускаться так же быстро, как поднимался". (*Прим. перев.*)

ни холодные ветры, если только погода ясная, изменения температуры представляют характер правильности, которая однако не показывает пропорциональности приростам высот. Понижение температуры очень быстро в начале; позднее, по мере подъема в воздушное пространство, это уменьшение мало-помалу замедляется. У поверхности почвы на каждые 200—300 фут. повышения температура понижается приблизительно по 1° Ф.; на 28 тыс. фут. над поверхностью земли, то же самое уменьшение температуры соответствует разности высот, равной 800—1000 фут.

Г. Глешер нашел этот результат, который, впрочем, согласуется довольно хорошо с наблюдениями в горных странах, рассматривая разности температур в соответствии с разностями высот, вычисленными при посредстве барометрических наблюдений; другими словами, он пользовался наиболее употребительным методом — методом отношений между уменьшениями температуры и приростами высоты. Ряд разностей температуры, полученных во время различных восхождений, дает место различным средним для ясной и для пасмурной погоды. Этот прием, употребленный г. Глешером, должен, по нашему мнению, считаться ошибочным.[1] Действительно, если мы изучаем средние г. Глешера, содержащиеся в мемуарах, представленных в 1862—1863—1864 гг., мы легко видим, что эти средние изменяются значительно при каждом новом восхождении. Этот недостаток однородности в средних зависит от того, что изменения температуры являются функциями не только высоты, но также и начальной температуры. Этот факт вытекает явным образом не только из наблюдений самого г. Глешера, но также и из результатов, полученных из метеорологических наблюдений в горных странах. Приведем, например, данные г. Плантамура, признаваемые классическими:

	Зима XII. I. II	Весна III. IV. V	Лето VI — VIII	Осень IX - XI
Женева (средн. за 40 лет) . . .	+ 0.60	+ 8.82	+ 17.77	+ 9.63
С. Бернар (за 27 лет)	— 8.40	— 3.36	+ 5.42	— 1.82
Разность[2]	9.00	12.18	12.35	11.45

Нельзя, следовательно, выводить общее среднее из разностей, полученных в восхождениях, которые были произведены

---

[1] В немецком тексте „Поэтому прием, употребленный г. Глешером, с моей точки зрения, нельзя рекомендовать". (*Прим. перев.*)

[2] Причина увеличения разности температур весною определяется, очевидно, таяньем снегов. Норвежский метеоролог г. Мон приписывает в своей великолепной работе „Grundlage der Meteorologie" (1875, p. 38) это изменение разностей между температурами в Женеве и на Большом С. Бернаре различиям в гидрометрическом состоянии этих двух местностей.

в условиях очень изменчивой температуры на уровне почвы;[1] в самом деле, чем выше температура слоев воздуха, соприкасающихся с землей, тем значительнее различия температур, соответствующих одному и тому же возвышению над землею. Сверх того, самые большие высоты, которых достиг г. Глешер в своих многочисленных восхождениях, сильно различаются между собою, и среднее из разностей, полученных во время этих восхождений, будет для нижних слоев представлять истинный результат всех наблюдений, тогда как для высоких областей это среднее будет относиться только к некоторым из опытных данных,[2] в результате чего оно еще более отличается от своего действительного значения.

Невозможно поэтому основываться на средних, полученных г. Глешером. Они имеют достоинство великолепных показательных данных, но отнюдь не имеют достоинства представлять цифровую сводку наблюденных фактов.[3]

Г. Глешер приводит все числа, которые он получал в большой подробности, и этим он нам дает средство пользоваться его работою, не обращая внимания на особенности употреблявшегося им метода. В вычислениях такого рода необходимо избегать обычного приема сравнения изменений высот с изменениями температур, потому что определения высот основываются на гипсометрических формулах, которые основаны на трех предположениях: распространение закона Мариотта на разреженные газы, пропорциональность изменений температуры высотам и, наконец, полный покой атмосферы. Однако все эти три гипотезы неосновательны;[4] опыты, которые я делал при содействии покойного Кирпичева и отчет о которых находится в моей работе „Об упругости газов" (1875, т. I), приводят нас к заключению, что закон Мариотта не может прилагаться, по крайней мере точно, к разреженным газам; выше мы уже доказали, что пропорциональности изменений температуры изменениям высот не существует; что же касается устойчивого равновесия в атмосфере, то известно, что оно далеко не соответствует действительности.

Все это доказывает, что для того, чтобы найти закон изменений температуры в различных атмосферических слоях, надо

---

[1] В немецком тексте эта фраза передана так: „Таким образом, невозможно выразить найденные разности одним общим средним, потому что температуры вблизи почвы чрезвычайно различаются при различных путешествиях". (*Прим. перев.*)

[2] В немецком тексте эта фраза передана иначе: „Тогда как для высоких областей это среднее основывается лишь на немногих наблюдательных данных". (*Прим. перев.*)

[3] В немецком тексте последняя фраза изложена так: „Они в частностях поучительны, но в общем не представляют числовой сводки". (*Прим. перев.*)

[4] Этой фразы нет в немецком тексте. (*Прим. перев.*)

вывести из воздухоплавательных наблюдений именно соотношение между изменениями *температур* и изменениями *давлений*; в самом деле, и те, и другие являются непосредственными результатами прямого наблюдения. Нет сомнения, в конце концов, что между давлениями и температурами должно существовать простое и прямое отношение, потому что изменение температуры зависит главным образом от изменения давления, т. е. от расширения газа.[1]

На основании этих соображений я попытался подсчитать температурные данные и данные по давлению, собранные непосредственно г. Глешером в различных слоях атмосферы. Некоторые из этих наблюдений, например наблюдения 17 июля 1862 г., так неправильны для высоких слоев, что г. Глешер сам их отбросил при выводе своих средних. Надо также отбросить все числа, полученные в слоях, где был встречен поток теплого воздуха, идущий с юго-запада, соответствующий направлению Гольфштрема [и увеличивающий значительно температуру воз-

---

[1] Если бы эта причина определяла полностью изменение температуры, мы имели бы по механической теории тепла следующее уравнение, которым мы обязаны Пуассону:

$$\lg \frac{273+t_0}{273+t} = 0.291 \lg \frac{H_0}{H_1},$$

где t_0 и t представляют температуры в стоградусных градусах, H_0 и H_1 — давления на двух точках наблюдения и число 0.291 есть числовое значение отношения $\frac{c-c'}{c}$, c — теплоемкость воздуха при постоянном объеме, тогда как c' — та же теплоемкость под постоянным давлением. Делая $H_0 = 760$, $t_0 = 13°$ мы будем иметь для $H_1 = 380$ значение $t = -39°$; прямые наблюдения воздухоплавателей дают нам в тех же обстоятельствах значения t, изменяющиеся между $-13°$ и $-18°$.

Охлаждение, следовательно, меньше, чем если бы оно зависело всецело от расширения.

Но если мы примем, что воздух, поднимаясь и охлаждаясь, теряет часть своих водяных паров, которая обращается в жидкое состояние, мы легко поймем, что температура воздуха будет более высокой. Так, в нашем примере 1 кг воздуха, подымаясь к высшему слою, может потерять 0.009 кг водяного пара, приобретая 5.4 кал. Повышение температуры, которое этому соответствует, есть 22°. Воздух же будет иметь температуру уже не $-39°$, как это указывала формула, но скорее $-17°$, что довольно близко к числам, полученным прямым наблюдением. В результате, следовательно, два различных действия определяют температуру верхних слоев атмосферы: расширение, причиняемое уменьшением давлений, и различие, которое существует между количествами водяного пара, содержащегося в нижних слоях, с одной стороны, и в высоких областях, с другой. Первое из этих влияний влечет к уменьшению, второе к увеличению температуры этих высоких атмосферических областей, и одновременным соединением этих двух влияний надо объяснять физическую причину действительной температуры. До сих пор никто, по крайней мере насколько известно, не рассматривал еще этот вопрос *во всем его объеме*, — почему я предполагаю взяться за него снова в ближайшем будущем в особой работе.

душных слоев, через которые он проходит];[1] таков, между прочим, случай наблюдений 26 июля 1863 г. Наоборот, имеются другие (напр. наблюдения 29 сентября 1863 г.), когда встретился поток холодного воздуха в верхних слоях, в результате чего получилось чрезвычайное понижение температуры. Наблюдения, сделанные в туманную, дождливую или снежную погоду и т. д., должны быть точно также исключены из подсчета средних ввиду того, что делают невозможною какую-либо правильность в распределении температур.[2] Облака действуют одновременно как экран, который задерживает испускание тепловых лучей, и как источник холода или тепла в связи с тем, что в их массе (или в небольшом расстоянии от них) совершаются конденсация паров или испарение воды. Впрочем, если отбросить эти сомнительные данные, у нас остается еще большое количество фактов, среди которых мы должны придавать особенное[3] значение тем, которые были собраны на больших высотах — в слоях, где можно получить значительные различия в температурах и давлениях.

Так как г. Глешер совершал свои наблюдения очень быстро [одно за другим], так как их число очень значительно и так как предварительная проверка показала, что отношение между температурами и давлениями изображается кривой, довольно близкой к прямой, то для того, чтобы сначала исключить неизбежные ошибки разрозненных наблюдений, я брал среднюю нескольких данных (5 или 10), столь же близких по отношению к температуре, как и по отношению к давлению и полученных раздельно — частично во время поднятия, частично во время спуска. Интерполяция в узких пределах дала мне средние температуры, относящиеся к различным давлениям (27.5, 25, 22.5 и т. д. англ. дюйм.), и позволяет мне отсюда вывести общие средние, соответствующие подъему и спуску.

Этот способ вычисления необходим не только потому, что наблюденная температура была во время восхождения выше, а во время спуска ниже, чем действительная, но еще и потому, что с течением времени температура меняется и что средняя окончательных результатов при восхождении и при спуске дает нам результаты, более соответствующие действительности. Особенно приложимы эти соображения к восхождениям на значи-

---

[1] Фразы, помещенной в квадратных скобках, нет в немецком тексте (*Прим. перев.*)

[2] Эти две фразы изложены в немецком тексте так: „В известной мере как противоположность этому 29 сентября 1863 г. был встречен холодный поток воздуха, от которого должно было произойти исключительное понижение температуры. Вследствие его искажающего влияния должны быть также в конце концов исключены при вычислении средних величин числа, найденные при туманной, дождливой и соединенной со снегом погоде". (*Прим. перев.*)

[3] В немецком тексте: „наибольшее". (*Прим. перев.*)

тельную высоту, во время которых движения подъема и спуска следуют друг за другом быстро и довольно правильно. Мы можем привести между прочим путешествие 31 марта 1863 г.: восхождение началось в 4 ч. 10 м., и момент достижения самой высокой точки имел место в 5 ч. 27 м., тогда как в 6 ч. 25 м. путешествие было закончено; это значит, что восхождение длилось 77 мин., а спуск 58 мин. Во время первого периода было сделано 35 и во время второго — 45 наблюдений.

Различие, существующее между числами наблюдений во время восхождения и во время спуска, не влияет при употреблявшемся процессе вычисления на точность общей средней. Для вывода окончательных результатов я пользовался либо графическим методом, которым пользовался г. Глешер, либо, еще чаще, обычным способом интерполяции, отыскивая наиболее вероятное значение посредством нескольких значений.[1]

Как пример этого способа приведу данные, полученные г. Глешером во время наиболее высокого из его восхождений — восхождения 5 сентября 1862 г., оставшегося знаменитым в летописях воздухоплавания. Данные наблюдения были (Report of the 32-d meeting of the British Association, p. 440):

Подъем				Спуск			
Часы	Мин.	*H* в англ. дюйм.	*t* Ф.	Часы	Мин.	*H* в англ. дюйм.	*t* Ф.
1	5	29.17	59°.0				
—	5.3	28.97	57.2	2	39	27.60	53°.1
—	6	28.38	55.5	—	38	26.40	52.2
—	10	26.19	45.5	—	33	25.80	50.8
—	11.5	25.49	43.3	—	32	25.40	48.0
1	12	24.99	42.0	2	29.5	24.51	47.0
—	12.5	24.89	40.9	—	25	23.35	42.0
—	13	24.30	39.5	—	23.8	22.93	40.0
—	13.5	24.25	38.0	—	23.2	22.64	40.0
—	14.5	23.70	36.5	—	20.6	22.24	40.1
1	7	23.21	36.0	2	19.5	21.85	31.6
—	17.6	21.66	39.5	—	16.8	20.65	31.1
—	21	20.72	32.1	—	15	18.46	25.7
—	22	20.07	31.2	—	14	18.06	24.5
—	24	18.73	26.5	—	10	17.39	22.5

[1] В немецком тексте: „из нескольких значений". (*Прим. перев.*)

[2] В Уолвергемптоне, бывшем пунктом отправления, атмосферическое давление не изменялось, оставаясь постоянно равным 29.70, а температура колебалась между 64.°5 и 57.°2.

Подъем [1]				Спуск			
Часы	Мин.	H в англ. дюйм.	t Ф.	Часы	Мин.	H в англ. дюйм.	t Ф.
1	25,5	17.93	25.5	2	9.5	16.37	18.0
—	27.5	16.82	18.7	—	9	14.05	17.0
—	28	16.69	18.0	—	8.7	13.15	11.0
—	29	16.05	17.9	—	8.5	12.55	2.0
—	32	15.40	15.5				
1	37	14.55	15.6				
—	38.8	13.85	8.0				
—	48	11.95	0.0				
—	50	11.25	—2.0 [2]				
—	53	9.75	- 5.0 [2]				

Группируя эти данные по пяти (для спуска первая и последняя группа состоят только из четырех чисел), мы получаем следующие средние:

Часы	Мин.	H	t Ф.	$\frac{dt}{dh}$	Часы	Мин.	H	t Ф.	$\frac{dt}{dh}$
1	8	27".64	52°.1	3.96	2	35	26".30	51°.0	2.90
—	13	24.43	39.4	1.88	—	24	23.13	41.8	3.66
—	20	21.08	33.1	2.55	—	15	19.28	27.7	2.99
—	28	16.58	19.1	3.67	—	9	14.03	12.0	
—	45	12.27	3.3						
			Средн.	3.01				Средн.	3.18

Из этих последних чисел мы выводим следующие значения, соответствующие восхождению и спуску:

Высота барометра в англ. дюйм.	Температуры в градусах Ф.				
	Наблюденные		Среднее наблюдение	Вычисленные по формуле (A)	Разность Δ
	Подъем [1]	Спуск			
27.5	(1 ч. 8 м.) 50°.1	(2 ч. 38 м.) 55°.2	(1 ч. 53 м.) 52°.7	52.9	—0°.2 Ф.
25.0	(1 ч. 12 м.) 42.6	(2 ч. 31 м.) 47.3	(1 ч. 51 м.) 45.0	45.1	—0.1
22.5	(1 ч. 17 м.) 35.5	(2 ч. 23 м.) 38.9	(1 ч. 50 м.) 37.2	37.3	—0.1
20.0	(1 ч. 22 м.) 29.6	(2 ч. 16 м.) 30.9	(1 ч. 49 м.) 30.3	29.6	+0.7
17.5	(1 ч. 27 м.) 22.1	(2 ч. 12 м.) 22.5	(1 ч. 50 м.) 22.3	21.8	+0.5
15.0	(1 ч. 35 м.) 12.9	(2 ч. 10 м.) 14.6	(1 ч. 53 м.) 13.8	14.1	—0.3
12.5	(1 ч. 46 м.) 5.4	(2 ч. 8 м.) 6.6	(1 ч. 57 м.) 6.0	6.3	—0.3

$\sqrt{\frac{\Sigma\Delta^2}{n}} = 0°.38$ Ф.

[1] См. предыдущую страницу, сноску 2. (*Прим. ред.*)

[2] Во французском тексте по опечатке знак минус пропущен. (*Прим. перев.*)

Числа четвертого столбца представляют результаты общих средних наблюдений, сделанных во время этого путешествия. Эти вычисления, произведенные над полученными г. Глешером результатами, привели меня к убеждению, что существует очень простое соотношение между давлениями и температурами и что это соотношение представлено прямой линией, за исключением неизбежной ошибки подобных наблюдений, не выходящей, однако, за пределы весьма приемлемой точности.[1] Таким образом, приведенные выше наблюдения 5 сентября 1862 г. должны быть представлены прямой:

$$t = -32.5 + 3.103\ H,^{2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (A)$$

где t есть температура, данная в градусах Фаренгейта, и H — соответствующее давление в англ. дюймах. Числа, отвечающие этой формуле, включены в 5-ый столбец таблицы.

Для восхождения 31 марта 1863 г., о котором мы также упоминали и во время которого давление в верхнем слое было равно 12.4 дюйм., наиболее вероятная прямая изображается формулою:

$$t = -29.2 + 2.404\ H.$$

Я приведу еще три примера, взятые из менее высоких восхождений:

30 июля 1862 г., при облачном небе и при минимальном давлении в 23.4 дюйм., — наблюдения выражаются формулою:

$$t = -31.7 + 3.20\ H.$$

Для восхождения 9 октября 1863 г. при совершенно ясном небе и при минимальном давлении в 22.5 дюйм. наиболее вероятной прямой оказывается:

$$t = -33.0 + 2.76\ H.$$

29 августа 1864 г. погода была совершенно ясная, давление при максимуме подъема было 17.7 дюйм., температура на поверхности земли изменялась между 72°.5 и 69°.0; для слоев воздуха, где H больше 20 дюйм.,[3] прямая изображается формулою:

$$t = -37.77 + 3.620\ H.$$

В общем соотношение, существующее между давлениями и температурами, полученными г. Глешером, представляется прямой линией:

$$t = C + kH,$$

---

[1] В немецком тексте иначе: „которая, однако, достаточно мала, чтобы обеспечить весьма приемлемую точность". (*Прим. перев.*)

[2] Для параболического выражения ($t = -36.9 + 3.578\ H + 0.0117\ H^2$) значение $\sqrt{\frac{\Sigma\Delta^2}{n}} = 0.°25$ Ф.

[3] По г. Глешеру, на этой высоте имел место поток теплого воздуха.

где C и k — постоянные. Отсюда вытекает эмпирическое заключение, что *приросты температуры — пропорциональны приростам давлений*, т. е.:

$$\frac{dt}{dh} = k.$$

Коэффициент k изменяется от одного восхождения до другого. Следующая формула дает нам эмпирическое отношение температур и давлений:

$$t_1 = C + H\frac{t_0 - C}{H_0}.$$

Если, следовательно, мы знаем значение C и давление H_0, а также температуру t_0 в какой-нибудь точке атмосферы в ясную погоду, мы можем легко вывести из них температуру t_1 места, расположенного на той же вертикали, но в котором давление оказывается равным H_1.

Таким образом, задача сводится к определению одной постоянной C, от которой зависит закон изменения температур в зависимости от высот подъема.

Если сравнить лучшие наблюдения г. Глешера, то мы легко заметим, что значение C почти неизменно, будут ли наблюдения сделаны утром или вечером и в какое бы то ни было время года; более того, мы видим, что эта величина не зависит нисколько от начальной температуры, измеренной у поверхности земли. Весьма незначительные разности, какие мы замечаем в значениях C, полученных во время различных восхождений, нельзя считать существенными; гораздо более вероятно, что они зависят только от неизбежных во всяком наблюдении ошибок.

В соответствии с предыдущим значение C дается уравнением:

$$C = \frac{t_i H_0 - t_0 H_i}{H_0 - H_i}.$$

Ошибка ΔC будет связана с ошибками наблюдений Δt и ΔH следующим образом:

$$\Delta C = \pm\frac{t_0 + t_i - 2C}{H_0 - H_i}\Delta(H) \pm \frac{H_0 + H_i}{H_0 - H_i}\Delta(t).$$

Но в отдельных наблюдениях, если можно ожидать ошибку в 0.05 дюйм. для ΔH и 2° Ф. для Δt, то для $t_0 = 60°$, $t_i = 30°$, $H_0 = 30$, $H_1 = 20$ мы найдем ошибку в значении C, достигающую 10.°7 Ф. Однако значения C, определенные по данным г. Глешера, различаются лишь очень мало между собою; отсюда следует, что значение C можно рассматривать как постоянное.

Среднее значение C, выведенное из наиболее достоверных из всех наблюдений г. Глешера, есть — 32.°5 (Ф.), или очень близко к —36° по стоградусной шкале, или —29° по Реомюру.

Раз мы допускаем, что C есть число постоянное, мы получаем очень простой эмпирический закон для изменения температуры

от одного атмосферического слоя к другому. В градусах стоградусной шкалы этот закон будет дан следующим уравнением:

$$t_i = -36 + \frac{t_0 + 36}{H^0} H_i.$$

Припоминая то, что было сказано выше о постоянных ошибках в наблюдениях г. Глешера, мы легко поймем, что среднее значение C, выведенное из данных наблюдений этого ученого, должно быть больше, чем ее действительное значение. Подтверждается это тем, что наблюдения в горных странах приводят к значению C более низкому, чем то, какое получается из обсуждения данных г. Глешера. Заимствуя из обзора г. Плантамура средние за 10 последних лет для Женевы и для С. Бернара, мы находим $C = -39.°2$ по стоградусной шкале, а взяв такие же самые средние за 30 последовательных лет, мы получим $C = -39.°9$. Если мы исправим эти значения, принимая в расчет долготу и широту этих двух мест, мы получим приблизительное значение C, равное —42° по стоградусной шкале. Средние, полученные в июле и в августе — за время года, когда почти нет снега на С. Бернаре, дают $C = -36.0$. В декабре и январе, когда снег доходит иногда до Женевы, получается $C = -37.7$. Весною, в эпоху таяния больших снегов С. Бернара, значение C гораздо более значительно и изменяется в общем от февраля до июня между —40 и —49°, что зависит, вероятно, от понижения температуры, вызываемого таянием снегов. Наблюдения, сделанные (за 10 лет) одновременно в Шомоне и Невшателе, высоты которых различаются на 664 м, дают для C значение —36.4.

Наблюдения г. Бауернфейнда, сделанные в Мизинге в Баварии на 4 точках, которые были определены нивелировкой и крайние из которых различаются по высоте на 1068 м, дают:

$$C = -39.°5.$$

Первые наблюдения последнего столетия, сделанные Шарлем (Париж), как и наблюдения Захарова (С.-Петербург), сделанные в 1804 г., определяют значение C приблизительно равным —40°.

Из этих данных, как и еще из многих других, можно вывести с уверенностью, что в границах возможной точности в наблюдениях для местных метеорологических условий значение постоянной C остается одинаковым по крайней мере во всех слоях, какие возможно было достигнуть до настоящего времени. [1]

Физический смысл постоянства значения C понятен сам по себе; эта величина означает температуру слоя атмосферы, где

[1] Возможно, что данный выше эмпирический закон не был бы приложим к слоям воздуха, в которых давление ниже 9 дюйм. и которых ни один воздухоплаватель еще не достиг. Ответ на этот вопрос может быть найден изучением рефракции этих слоев.

давление было бы почти нулевое, если бы закон изменения температур оставался тем же самым вне границ, достигнутых до настоящего времени.

Известно, что до сих пор всегда выводили температуру высших слоев, исходя из совершенно иных соображений, гораздо более абстрактных, и что находили значение, также очень отличное от того, какое мы получили (а именно от 50 до 273° по стоградусной шкале).

Тем не менее не надо думать, что значение C будет постоянным под всеми географическими широтами, потому что в холодных областях земного шара температура иногда ниже —36°. Но так как наблюдения, сделанные членами альпийского клуба в высоких Альпах над минимумом температуры,[1] показывают, что на высоких горах температура никогда не бывает очень низка (на 10000 англ. фут. —27° Ц.), то можно все же думать, что значение C под средними широтами довольно близко к постоянному. Итак, в заключение можно сказать, что правильное изучение полученных данных, в горах ли, или во время аэростатических восхождений, приводит почти всегда к тому же самому значению C; тем не менее нельзя быть достаточно уверенным, что это значение не изменяется с географическими широтами и долготами, с часом дня или временем года, наконец, с состоянием поверхностей солнца и земли. Чтобы решить эти вопросы, а также чтобы подтвердить эмпирический закон изменения температуры в различных слоях атмосферы, необходимо вооружиться многочисленными новыми аэростатическими наблюдениями, произведенными в различных странах и при различных условиях температуры, времени года и суток.

Значение применения закона изменения температур для метеорологии, космографии, геодезии и астрономии так же, как интерес для физика того простого соотношения, которое должно существовать между давлениями и температурами в различных слоях воздуха, все это делает решение задачи как нельзя более необходимым. Я упомяну несколько следствий, которые получатся, если принять выведенный выше эмпирический закон; гипсометрическая формула могла бы быть выведена без обращения к неосновательной [2] гипотезе, относящейся к изменению температуры; законы рефракции, которые зависят от изменения температуры в различных слоях воздуха, также потеряют тот произвольный [3] характер, который они имеют сегодня. Гипсометриче-

---

[1] Идея постоянной температуры в небесном пространстве есть лишь фикция, потому что невозможно предположить там что бы то ни было весомое; а если это так, то нет никакого основания думать, что температура высоких атмосферических областей будет повсюду однородно одинаковой.

[2] В немецком тексте: „произвольной". (*Прим. перев.*)

[3] В немецком тексте: „недостоверный". (*Прим. перев.*)

ские данные, как и наблюдения астрономической и земной рефракции, смогут служить средством проверки закона, о котором идет речь, почему будет существенно полезно при будущих аэростатических восхождениях присоединить [1] также наблюдения над явлениями рефракции.

Многочисленные данные по температуре в горах, полученные в разных странах, могут служить средствами [2] для определения местных особенностей различных точек, если эти данные затем сравнивать между собою, пользуясь формулою, легко выводимой из эмпирического закона. Если принять $C = -36°$ (Ц.), то из гипсометрической формулы можно извлечь такое следствие, а именно: что изменение на 1° (Ц.) соответствует поднятию на высоту, равную

$$8000\left(\frac{1+\alpha t}{36+t}\right).$$

Следовательно, если температура на поверхности океана есть 0°, то надо подняться на высоту в 222 м, чтобы иметь уменьшение на 1°, а если температура есть $+20°$, то подъем должен быть на 153 м.[3]

Имея в виду настоятельную необходимость получить новые данные о температуре воздушных слоев, а именно данные, получающиеся при помощи воздушных восхождений, было бы очень желательно, чтобы соответствующие опыты были организованы с самою большой тщательностью. Франция и Англия уже много сделали для решения этого вопроса; теперь очередь других государств собирать в наибольшем количестве необходимые данные.

Я считаю своим долгом прибавить еще несколько коротких замечаний относительно тех практических способов, которые должны быть, по моему мнению, употреблены в наблюдениях этого рода и которые я предполагаю осуществить когда-нибудь в различных краях России, если найду необходимые средства. Страна эта, благодаря своему континентальному климату, очень благоприятна для опытов такого рода. Самый большой интерес для подтверждения закона представляют, конечно, наиболее высокие восхождения. В нижних слоях атмосферы влияние земной поверхности, очевидно, очень существенно, однако на пребывание в верхних слоях смотрели до сих пор или как на совершенно невозможное, или же, если кто-нибудь рисковал на это, время пребывания там было чересчур коротко. Воздухоплаватели владели только аэро-

[1] В немецком тексте: „обратить внимание". (*Прим. перев.*)

[2] В немецком тексте: „иметь значение". (*Прим. перев.*)

[3] Гумбольдт нашел для тропиков высоту от 180 до 250 м, что нас заставляет думать, что в этих местах температура C должна быть выше, чем в умеренных зонах.

статами слишком незначительной подъемной силы [1] и не были защищены против убийственного влияния разреженного воздуха. Вспоминается несчастный случай, происшедший недавно с двумя французскими воздухоплавателями, которые пытались достигнуть очень высоких областей. Надо, поэтому, иметь в виду точность наблюдений и безопасность наблюдателя в верхних слоях, иметь аэростат возможно большей емкости, который заключал бы в себе самое меньшее от 2000 до 3000 куб. м водорода. Светильный газ, даже если он декарбонизирован, каким был в шаре г. Глешера, очень уступает ему для восхождений на значительные высоты. Формой, наиболее подходящей для аэростата, предназначаемого для подъемов на большие высоты, является двойной конус высотою $r\sqrt{3}$. Употребляя подобную форму, теряют сравнительно со сферической формой около 10% в поверхности, но выигрывают очень много на системе швов. Швы сферических баллонов делают их слишком тяжелыми и предоставляют мало гарантий прочности. Кроме того, практическая постройка прибора таким образом значительно облегчается ввиду того, что главной целью является непроницаемосгь. Для большей безопасности наблюдатель должен будет поместиться в лодку, герметически закрытую и постоянно наполненную воздухом под обычным давлением. Эллиптический резиновый баллон, крепко опутанный снаружи веревками и снабженный предохранительным клапаном от резервуара со сжатым воздухом, достаточен для выполнения этого условия. Наблюдатель таким образом останется все время под давлением, довольно близким к обычному атмосферическому, и сможет вне всякой опасности делать свои наблюдения и управлять шаром. [2] Этим способом, владея аэростатом упомянутых размеров, можно надеяться достигнуть высот, которые превзойдут высоты, достигнутые г. Глешером, и произвести там регулярные наблюдения.

Кроме того, желательно иметь легкие регистрирующие приборы, которые могли бы записывать во время восхождения время, давление, температуру и влажность. Владея такими приборами, можно выполнять аэростатические наблюдения без помощи воздухоплавателя.

В нижних слоях можно пользоваться для тех же целей привязным аэростатом.

Мне кажется вполне возможным построить маленький записывающий прибор, применимый для аэростатических наблюдений, пользуясь металлическими барометрами и термометрами двойного действия, т. е. построить приборы, снабженные двумя

---

[1] В немецком тексте: „Подъемная сила применявшихся аэронавтами воздушных шаров была недостаточной, и воздухоплаватели...“ (*Прим. перев.*)

[2] Последних трех слов нет в немецком тексте. (*Прим. перев.*)

стрелками или подвижными указателями, которые отмечали бы две черточки, дающие значения, одна — температуры, другая — давления. Таким образом, например, коробка барометра должна быть снабжена с двух сторон упругими пластинками, такими, чтобы при каждом изменении давления эти два указателя приближались друг к другу или удалялись друг от друга и чтобы расстояние между ними могло определить давление. Этой конструкцией можно надеяться избежать влияния неодинакового перемещения различных частей прибора.

С.-Петербург, ноябрь, 1875.

1876. Сам удивляюсь, чего только я ни делывал на своей научной жизни. И сделано, думаю, недурно.

103. О барометрическом нивелировании и о применении для него высотомера. Оттиск из „Инженер[ного] журнала". 1876.

О БАРОМЕТРИЧЕСКОМ НИВЕЛИРОВАНИИ

И

О ПРИМЕНЕНИИ ДЛЯ НЕГО ВЫСОТОМЕРА

Д. МЕНДЕЛЕЕВА

С таблицею рисунков

Сумма, которая может быть выручена от продажи этого сочинения, назначается автором на устройство большого аэростата и вообще на изучение метеорологических явлений в верхних слоях атмосферы.

С.-ПЕТЕРБУРГ
Типография Департамента Уделов. Литейный пр., д. № 39
1876

ПРЕДИСЛОВИЕ

С 1872 года начаты мною исследования над упругостью газов. При подобного рода работах постоянно необходимо прибегать к определению атмосферного давления. Притом необходимо знать его со всею возможною точностью. Устроенные мною для того приспособления описаны в сочинении „Об упругости газов", т. I, 1875 г. Часто приходилось много раз в день знать точно атмосферное давление. Определение его каждый раз при помощи точного отчета показаний ртутного барометра — было очень утомительно. Поэтому, для сокращения времени, я устроил дифференциальный барометр, ясно указывающий не абсолютную величину давления, а только его перемены, происходящие с того момента, в который кран прибора заперт. Придуманные мною приспособления оказались удобными на практике. Перемены давлений прибор показывал с чрезвычайною точностью и ясностью, так что для наблюдения малейших изменений в давлениях, едва определяемых на ртутном барометре точными измерительными приборами, на дифференциальном барометре достаточно было отчета по шкале простым глазом. В этом убедило преимущественно то обстоятельство, что прибором этим можно было с значительною точностью определить разность высот предметов, помещенных в комнате. Высоты столов, окна и ступеней лестницы над полом были достаточны для ясных и правильных указаний перемен давления, замечаемых на устроенном приборе.

Это было первое нивелирование, произведенное моим дифференциальным барометром. Оно указало, что прибор этот можно применить для практической цели нивелирования и, после разнообразных попыток, устройство прибора доведено мною до того состояния, в котором он описан в этом сочинении. Сам я применял его в поле неоднократно и убедился в применимости его к обычной практике нивелирования. Весной 1875 года для той же цели устроены были приборы для генерального штаба

и затем применены в Финляндии для нивелирования. Так как там нивелирование ведется обычными геодезическими способами и притом с точностью весьма значительною, то была возможность точной проверки показаний прибора. Ныне чрез М. А. Савицкого я узнал, что показания прибора оказались точными в пределе десятых частей метра, т. е. именно такими, какими их можно было ждать.

В том же году, отвечая запросам, обращенным ко мне с различных сторон, я озаботился устройством дифференциальных барометров, назначенных для практического нивелирования и названных мною *высотомерами*. Они явились в продаже в магазине г. Рихтера. При этом оказалось и одно существенное затруднение. Недоставало руководства для употребления прибора на практике.

Это затруднение вызвало появление моей ныне предлагаемой статьи. В нее я включил, сверх описания высотомера и практических приемов, относящихся к нему, общую теорию барометрического нивелирования. На это было три причины. Главнейшая — недостаток в нашей литературе сочинений и трактатов, касающихся этого предмета с необходимою для ясности полнотою. Вторым побуждением служило желание мое изложить предмет в том отчасти самостоятельном виде, в каком весь вопрос о барометрическом нивелировании представлялся мне и в каком он изложен в этом сочинении. В-третьих, мне хотелось коснуться общего вопроса: о причинах неточностей обычного барометрического нивелирования и противодействовать предрассудку, распространенному между некоторыми учеными, считающими невозможным применение барометров к определению малых разностей высот. Они, не вникнув в причины различия между действительными высотами и теми, которые определяются барометрически, замечая, что обычные способы гипсометрии дают часто разности высот, достигающие несколько десятков метров, утверждают, что малых разностей высот барометры не покажут с надежною для практики точностью. К числу таких ученых относятся даже некоторые метеорологи.[1] Мнение о неприменимости барометров к точному нивелированию не только фактически опровергается, но представляется несостоятельным даже и при одном рассмотрении причин, по которым барометрическое определение высот далеко не сходится с точным нивелированием при определении значительных высот. Причины эти очевидно состоят в периодических переменах, совершающихся в атмосфере, в восходящих и нисходящих токах, в различии влажности и т. п.

---

[1] Напр. директор СПб. метеорологической обсерватории г. Вильд в сочинении „Ueber die Bestimmung des Luftdruckes" H. Wild. СПб., 1874. См. Метеорологический сборник, т. III, № 1, стр. 51.

причинах, которые тем меньшее имеют влияние, чем менее определяемые разности высот и чем ближе пункты, в которых делаются наблюдения. Неравенства давлений, имеющие место на далеко отстоящих пунктах одной горизонтальной поверхности (напр. на поверхности океана), не могут существовать, без бури или другого атмосферного переворота, на соседних местах. А в практике нивелирования все вопросы и сводятся на определение разностей высот близлежащих мест, незначительно друг над другом возвышенных.

Таким образом определилось содержание предлагаемой статьи. Она делится на две почти равные части. В первой говорится о барометрическом нивелировании вообще, выводятся гипсометрические формулы и описываются способы наблюдения давлений ртутными барометрами и анероидами. Во второй части описывается высотомер, выводятся формулы, которые необходимо применять, пользуясь им, и описываются практические приемы обращения с этим прибором.

Возможность практического применения высотомеров для съемок, а особенно таких, которые требуют скорости и дешевизны, каковы, например, съемки для военных целей, для картографических работ, для проведения железных дорог и т. п., была причиною того, что редактор инженерного журнала А. А. Савурский поместил мою статью в „Инженерном Журнале" — (1876).[1] Имея в виду содействовать дальнейшему распространению сведений о том же предмете, я издаю ныне особые оттиски той же статьи. Если мое изложение начал барометрического нивелирования и мое описание высотомера послужат только для одного того, чтобы вновь обратить внимание других исследователей на вопрос практического применения разных барометров для нивелирования, то уже и тогда моя цель будет выполнена.

Пользуюсь случаем для того, чтобы перечислить вкратце другие приложения, которые может иметь дифференциальный барометр как средство для точного и легкого определения перемен атмосферного давления.

Оно изменяется с периодами дня и года, с переменою ветра и вообще с изменением погоды.

Одно из основных положений метеорологии состоит в том, что в данном месте погода определяется преимущественно: 1) периодами дня и года и 2) направлением ветра, а этот последний есть результат неравенства давлений и плотностей на одном уровне. Ветер направляется из тех частей земной поверхности, где давление больше, в те, где давление меньше (на пути он

[1] Инженерный журнал 1876, отд. неоффиц., № 1, стр. 94—171 и № 2, стр. 269—348; ср. Д. И. Менделеев, Сочинения, т. VI, 1939 г., стр. 181—186 и 263. (*Прим. ред.*)

уклоняется, если переходит из одной широты в другую, сохраняя приобретенную скорость). Скорость его определяется (так называемым градиентом) разностью давлений на данном расстоянии. Приходя с разных сторон и с различною быстротою, воздух в данном месте земной поверхности претерпевает различные изменения: осаждает влагу в облака, дождь, снег и т. п. или растворяет в себя осадки, содействует охлаждению или нагреванию и т. п. Оттого-то барометр, будучи указателем давления — есть указатель и предсказатель погоды и перемен, в ней совершающихся. Это с поразительною ясностью и образцовым совершенством изложено в новейшей метеорологии норвежского ученого Мона, которой перевод, под моею редакциею, вскоре явится на русском языке. Перемены давления, едва заметные на ртутном барометре, выражаются на дифференциальном барометре величинами в 16 раз бо́льшими, а потому всякие изменения в давлениях на этом приборе становятся более очевидными. Часто, во время лета, в наших широтах переменам погоды предшествуют быстрые изменения давлений на несколько миллиметров ртутного столба. Эти величины превращаются на дифференциальном барометре в очевидные издали десятки миллиметров.

Поэтому дифференциальный барометр может быть поучительным помощником в изучении погоды и в ее предсказании. Для этой цели лучше всего такое устройство прибора, какое описано в моем сочинении „Об упругости газов", т. I, стр. 138.[1] Особенно важным кажется мне подобное применение дифференциального барометра для кораблей, ибо в море циклоны и другие виды бурь определяются и избегаются сообразно показаниям барометра. Здесь вопрос точного и скорого определения перемен давлений есть вопрос первостепенной важности, потому что задача сводится на то, чтобы избрать такое направление, в котором давление возрастает, так как место господства вихря — есть тот (подвижный) пункт, где давление наименьшее. Только пройдя значительное расстояние, можно заметить на ртутном барометре или анероиде — куда пошел барометр, т. е. двигается ли корабль к опасному центру вихря или удаляется от него, тогда как при помощи дифференциального барометра такое определение возрастания или убыли давления может быть произведено на расстоянии в 16 раз меньшем. Можно много выиграть во времени и дальше уйти от циклона, во-время заметив опасное к нему приближение.

Изменение плотности воздуха может кроме того представлять разнообразный интерес другого рода. Так, при равенстве давлений и при различии плотностей воздуха (происходящей от раз-

[1] Сочинения, т. VI, 1939 г., стр. 221 — 5[e]9. (*Прим. ред.*)

личия в температуре и влажности или в составе) будут происходить воздушные токи.[1] В частности, различия в плотностях воздуха могут определяться подмесями посторонних газов, напр. в рудниках — легкого болотного газа или тяжелого углекислого газа. Высотомер может служить простейшим средством для скорого определения плотности воздуха, потому что при данной разности высот — показания его будут зависеть преимущественно от перемены плотности воздуха. Для метеорологических целей было бы полезно и весьма поучительно делать систематические определения плотностей воздуха, наблюдая, какой перемене давлений отвечает каждый раз поднятие на некоторую точно определенную и сколько-либо значительную высоту, напр. на высоту башни, или небольшой уединенной горы, или даже на высоту высокой мачты. Наблюдения этого рода могут уяснить многое в отношении к вопросу о восходящих и нисходящих токах воздуха. Если притом будут известны давление, температура и влажность — получится, при помощи высотомера, данное, заключающее в себе все эти величины и могущее служить для их проверки, если все посторонние обстоятельства будут иметь ничтожное влияние. Укажу для примера, что в Петербурге, судя по многолетним средним (для давления, температуры и влажности) средние веса одного куб. метра воздуха (в кг) по месяцам суть:

Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
1.339	1.331	1.312	1.281	1.252	1.218
Июль	**Август**	**Сентябрь**	**Октябрь**	**Ноябрь**	**Декабрь**
1.204	1.213	1.240	1.269	1.297	1.324

Средняя за год плотность есть 1.2717. Знание плотности воздуха необходимо, кроме того, для определения рефракции, которая дает поправку наблюдаемых угломерными приборами угловых величин при геодезических и астрономических работах, для взвешиваний, когда требуется поправка на убыль веса в воздухе и т. п. Вместо определения трех величин (давления, температуры и влажности), по которым рассчитывается плотность воздуха, можно гораздо скорее и не менее точно определять плотность воздуха одним соответственным наблюдением, производимым с помощью высотомера.

В заключение прибавлю, что многими способами, кроме того, который применен мною в высотомере, можно с большою чувствительностью и точностью определять малые перемены давлений. Так, например, для этого можно пользоваться упругостью металлического, стеклянного или даже каучукового

[1] Обстоятельство это (различие плотностей) недостаточно разработано в современной метеорологии. Разработка его, повидимому, может уяснить многие стороны, поныне еще не ясные, в вопросе о направлении ветров и о ходе изменений погоды.

сосуда, наполненного жидкостью, снабженного горизонтальною капиллярною трубкою и замкнутого с пустотою поверх жидкости. Поместив такой сосуд в ванну (чтобы удерживать постоянную температуру и определять ее) и отчитывая положение жидкости в капиллярной трубке, — можно иметь точный прибор, подобный анероиду, но несравненно более его чувствительный. Можно устроить подобный прибор независимым от температурных изменений. Для этого должно взять два сосуда, герметически соединенные стеклянною трубкою: один с упругими стенками (как анероид) и с жидкостью, объем которой почти не изменяется от перемены давления, а другой сделать толстостенный и в него включить газ. Изменяя отношение емкости обоих сосудов и величину упругой поверхности, можно иметь такой прибор, в котором уровень жидкости не будет почти изменяться при перемене температур (а станет изменяться только от перемены давлений), потому что при повышении температуры станет возрастать упругость газа, а по мере того будет увеличиваться емкость упругого сосуда. Кроме того, легко применить высотомеры или подобные им приборы для графического нанесения разностей высот пройденных местностей, т. е. для устройства профилеграфов.

Если бы мне удалось возбудить интерес к делу разнообразных применений барометрического нивелирования в среде практиков и ученых, то я бы считал задачу предлагаемой статьи совершенно выполненною.

С. Петербург.
Университет.
1876 г., февраль.

О БАРОМЕТРИЧЕСКОМ НИВЕЛИРОВАНИИ И ПРИМЕНЕНИИ ДЛЯ НЕГО ВЫСОТОМЕРА

Картографическое изучение данной местности требует не только знания плана, т. е. проекции на горизонтальную плоскость, но и определения профилей, т. е. проекций на вертикальных плоскостях. Карты и планы стали уж всюду важным и даже необходимым пособием для множества практических потребностей. Но часто знание профилей не менее настоятельно, а их нет. Достаточно напомнить, что профилями определяется течение воды, многие метеорологические явления и распределение земных пластов. Для многих сооружений, имеющих в плане сколько-либо обширные размеры, знания разностей высот часто имеет первостепенное значение. По этим причинам географ, геолог и метеоролог, равно как инженер, сельский хозяин и военный начальник должны иметь такие же подручные средства для определения профилей, какими снабжены они для съемки планов. Разнообразной степени точности приемы и средства для съемки местности на план — всюду и с давних пор применяются, подробно описываются и изучаются. Этого нельзя сказать о средствах для определения профилей. Цель моей статьи состоит в распространении у нас точных сведений, необходимых для пользования барометрами как одним из легких и удобнейших средств для скорого определения разностей уровня с точностью, удовлетворительною для многих практических потребностей. Способы точного нивелирования сложны, дороги и требуют много времени, а применяемые часто в жизни средства, подобные ватерпасу и водяному уровню, — не дают возможности знать разности уровней с некоторою точностью при довольно значительных расстояниях, пригодны только при малой их величине. А между тем при чисто картографических работах, при проектировании крепостных верков и разного рода сооружений, при проведении путей сообщения, устройстве водяных сооружений, напр. при осушении болот, при запрудах, проведении каналов и т. п., в горнозаводском деле, а также и для других практических целей, бывает в высшей степени полезно, до производства

точного нивелирования данного участка, знание хотя приближенной разности уровней двух более или менее отдаленных одна от другой точек A и B. Сельскому хозяину часто и нет нужды в ином, как приближенное определение профилей. Такое сведение однако должно быть, когда проводят каналы или разбивают лес или пашню. Правильное пользование барометрами дает возможность быстрого определения профилей с такою степенью точности, которая часто совершенно достаточна для практических потребностей.

Представим, что чрез A и B проведены горизонтальные плоскости; вертикальная линия, измеряющая между ними расстояние, будет разность уровней A и B, или искомая высота. Эта разность, считая высоты снизу, будет положительною или отрицательною, смотря по тому, к какой точке A или B отнесена разность высот. Так, исходя из точки A, если B лежит выше ее, разность уровней будет для B положительною; исходя из B, высота точки A будет отрицательною. Если расстояние от центра земли до точки A назовем через z_0, а точки B через z_1, то, считая от A, искомая высота B будет $z_1 - z_0$. В дальнейшем изложении точка A будет считаться исходною.

Когда A и B лежат в близком одна от другой расстоянии, и особенно, когда пространство между ними ничем не заграждено, задача определения разности уровней решается простейшим образом при помощи различных способов проведения искусственного уровня. Тогда ватерпасом, правильно установленною нивелирною трубой, водяным уровнем или т. п. способами из A, или B или из некоторой третьей точки C проводится действительная или оптическая горизонтальная плоскость (или только линия). Измеряя расстояния точек A и B от этой горизонтальной плоскости, определяют разность высот. Сюда же относятся способы определения высот при помощи угломерных приборов, когда из определения углов и расстояний судят о высотах. Здесь опять требуется проведение уровня и свободное пространство между A и B или между C и A, с одной стороны, и C и B, с другой, чтобы иметь возможность направить луч зрения от одной из названных точек к другой.

Упомянутые выше тригонометрические, геодезические и т. п. способы нивелирования основаны на определении горизонтальной плоскости уровнями и на проведении прямых линий при помощи свойства светового луча распространяться по прямой линии. Эти способы столь выработаны и отличаются такой простотой основных начал, что в них можно ждать улучшений только со стороны приемов практического выполнения. На деле они становятся однако иногда весьма сложными, когда точки A и B находятся на значительном одна от другой расстоянии и когда пространство между ними занято преградами, что в практике

обыкновенно и встречается. Леса, строения, возвышения почвы, узкие повороты и т. п. препятствия часто преграждают возможность прямого нивелирования вышеописанными способами. Тогда приходится между A и B избирать многие промежуточные точки, между которыми нет препятствий, а чрез то работа значительно усложняется; способы же проверки, необходимой при всякой сложной работе, еще более замедляют нивелирование в вышеупомянутом случае. Все это вознаграждается весьма большою абсолютною точностью, какой можно достигнуть при упомянутых выше способах определения высот, а потому там, где необходима значительная точность результата, всегда будут прибегать к нивелированию при помощи вышеуказанных точных способов. Однако во множестве случаев, встречающихся в практике, нет нужды в нивелировании с большою абсолютною точностью, а желательно иметь, как сказано выше, возможно точный, скорый результат. При картографических работах, особенно при определении высот гор, при съемке подземных работ в минах и рудниках, при проектировании дорог и водяных сооружений и т. п. случаях, доли фута и даже целые футы в разностях высот сколько-либо отдаленных пунктов нередко не имеют никакого значения, потому что естественные неровности местности превосходят эти величины. Сверх того, во многих случаях, напр. в горах, наклонение земной поверхности очень быстро, и задача нивелирования сводится на определение профиля в крупных чертах, не касаясь подробностей. Без особенных тщательно установленных меток и нет пользы в нивелировании с большою точностью. Малые, естественные неровности почвы, напр. кочки и т. п., устраняют возможность определения разностей уровней с значительною точностью.

В тех случаях, где не требуется большой точности в определении высот, барометрическое нивелирование может быть весьма выгодным, потому что совершается весьма легко и скоро, несмотря на значительное расстояние мест A и B. Здесь нет нужды обращать внимания на промежуточные препятствия, необходимо только в данное время знать давления воздуха, определяемые барометрами в A и B, и сверх того при этом определять другие данные (температуру и влажность), от которых зависит плотность воздуха. Эти немногие наблюдения в A и B дают возможность узнать разность их уровней. Изложение основных начал такого нивелирования составляет первый предмет этой статьи. Сам по себе вопрос сложен и со стороны теории, и со стороны практики, а по разнообразию способов для определения давлений и по недостаточности некоторых необходимых сведений о воздухе (напр. о распределении влажности и температуры в разных его слоях) он, очевидно, подлежит еще дальнейшей разработке. В предлагаемой статье я старался соединить запас важнейших

сведений об этом предмете, дополнить их некоторыми своими выводами и применить их к практическим целям нивелирования при помощи дифференциального барометра или высотомера, устроенного мною в последнее время. Основную цель статьи моей составляет стремление обратить внимание на возможность усовершенствования барометрического нивелирования, чтобы сделать этот легкий способ определения высот возможным в применении не к одним географическим работам, как это было до сих пор, а ко многим прямым практическим потребностям, в которых требуется знание небольших разностей уровня. Если я останавливаюсь долго на описании высотомера и над приемами, которые дают, при его помощи, возможность нивелировать, то делаю это в виду того, чтобы над частным примером ближе познакомить с сущностью вопроса. Притом я желаю этим удовлетворить вопросам, с разных сторон обращенным ко мне, по поводу моего прибора. Цель моя будет совершенно достигнута, если мне удастся внушить читателям уверенность в том, что нивелирование при помощи видоизмененных барометров может быть удовлетворительным для многих случаев практики и что разработка этого вопроса заслуживает полного внимания практиков.

Барометрическое нивелирование в сущности основывается на свойстве воздуха, как и всякой другой жидкости, состоящем в том, что давление во всех точках, лежащих в жидкости на одной данной горизонтальной плоскости, одно и то же; на высшем уровне оно меньше, а на низшем давление более, чем на этой плоскости; разность же давлений в двух точках A и B равна весу столба жидкости, имеющего высоту, равную разности уровней. Возьмем сосуд с жидкостью, имеющею удельный вес s (вес одной куб. меры, напр. куб. метра в единицах веса, напр. килограммах), и пусть на всей поверхности жидкости будет одно и то же давление, которое назовем через H. Выразим это H в тех же единицах, как и s, т. е. приняв s за вес куб. метра в килограммах, означим через H давление в килограммах на кв. метр. Для определения этого давления H может служить барометр. Если бы в барометре нашем была жидкость, для которой $s=1$, то высота жидкости (в метрах) в барометре выражала бы давление H. Если барометрическая жидкость имеет удельный вес s_1, а высота ее в барометре $=B$, то $H=Bs_1$. За единицу высот мы станем в этой статье принимать метры, а за единицу веса килограммы. Вес куб. метра воды при 4° равен 1000 кг, а ртуть при 0° в 13.5959 раз плотнее воды, а потому в наших единицах для ртути $s=13595.9$. Нормальное давление атмосферы, при широте 45°, на уровне океана принимается $=760$ мм ртутного столба, а потому оно равно по принятым здесь мерам: $0.76\cdot13595.9=10\,333$ кг на кв. метр (или 1033.3 г на кв. сантиметр). Итак, означим через H давление на поверхность. На всех точках плоскости, находящихся под поверх-

ностью на глубине h (м), давление будет $H+hs$; на глубине h_1 оно будет $H+h_1s$ и т. д. При этом выражении давлений предполагается уже, что единицы меры избраны одни и те же как для выражения высот, так и давлений.

Представим теперь, что на некоторой глубине, под поверхностью однородной жидкости, напр. в океане, в точке A мы измерили давление H_1, а в другой точке B измерили давление H_2. По этим данным, если s для морской воды известно, легко узнать разность высот точек A и B, ибо давление в точке A равно давлению H на поверхности, сложенному с давлением слоя воды высотою, равною глубине h_1 точки A, т. е.

$$H_1=H+sh_1;$$

точно также для точки B давление:

$$H_2=H+h_2s;$$

отсюда чрез вычитание получаем для определения искомой разности высот уравнение:

$$H_1-H_2=s\ (h_1-h_2).$$

Здесь h_1 и h_2 суть глубины точек A и B под поверхностью, а нам нужны высоты. Если назовем чрез Z высоту поверхности над дном, то очевидно, что высота точки A над дном или Z_1 будет $=Z-h_1$, а высота точки B будет $Z_2=Z-h_2$, следовательно искомая разность высот Z_2-Z_1 точек A и B или, судя по условию, высказанному в начале статьи, искомая высота точки B над точкою A будет:

$$Z_2-Z_1=(Z-h_2)-(Z-h_1)=h_1-h_2=\frac{H_1-H_2}{s} \quad . \ . \ . \quad (I)$$

Если A выше B, то давление H_1 будет меньше H_2, а потому Z_2-Z_1 будет величиною отрицательною; если же B выше A, то разность будет положительною, как и должно быть по условию обозначения высот, указанному в начале статьи.

То же самое будет и в каждой другой жидкой среде, а следовательно и в воздухе, а потому, определяя барометрическое давление H_1 и H_2 в точках A и B, можно узнать разность высот этих точек, если знать плотность воздуха в пространстве между A и B. На этих началах основано барометрическое нивелирование, принцип которого впервые постиг Паскаль слишком за 200 лет тому назад, что́ проверено им в Париже на башне Сен-Жак, а его учеником Перье на горе Пюи-де-Дом. Эти первые опыты послужили исходом для дальнейшей разработки вопроса о применении барометра к нивелированию. Галлей дал основные начала для теории барометрического нивелирования; Лаплас, а по его следам Бессель дали формулы, которыми необходимо пользоваться при барометрическом нивелировании. Эти формулы носят название *гипсометрических*. Да́лее, в особом отделе этой статьи будет изложен способ вывода гипсометрических формул в том

виде, который, удовлетворяя современным сведениям о вопросе, представляет в то же время наибольшую возможную простоту. Применение барометра к нивелированию особенно много обязано трудам Делюка, Соссюра, Рамона и Плантамура. Они, на основании многих сличений высот, определенных или прямым нивелированием, или тригонометрически и барометрически, указали приемы барометрического нивелирования, вошедшие в практику, особенно при географических исследованиях. В этом последнем случае являются задачи двух родов. Чаще всего требуется определение абсолютной высоты над уровнем моря, в других случаях производятся определения разности высот двух близлежащих мест, напр. вершины горы и ее подошвы. В первом случае, напр. при определении высоты над уровнем моря некоторого плоскогорья, когда море лежит далеко и когда самая местность имеет значительные неровности почвы, не может быть и речи о значительной точности определения высоты, а потому этот случай мы не будем иметь вовсе в виду при дальнейшем рассмотрении. Второй же случай есть случай прямого барометрического нивелирования. Такое нивелирование употреблялось долгое время почти исключительно для определения значительных высот, напр. высот гор. Так, Рамон в течение 5 лет определил в Пиренеях высоты многих гор этим путем. Высоты большинства доступных гор определены барометрически. Только в последние годы, а в особенности с тех пор, когда, вместо ртутных барометров, стали распространяться для нивелирования анероиды, обращение с которыми несравненно легче, чем с ртутными барометрами, стали применять приемы барометрического нивелирования к определению сравнительно небольших высот, в особенности при предварительно производимых изысканиях для проведения железных дорог. Для нивелирования в тесном смысле, т. е. для определения небольших разностей высот, до сих пор барометры не применялись, потому что, при небольших переменах высот, давления изменяются незначительно, а ни ртутные барометры, ни анероиды не дают практической возможности определять малые разности давлений, а следовательно и не могут служить для определения малых разностей высот. Дифференциальный барометр, устроенный мною два года тому назад, дает эту возможность, как то изложено было мною первоначально в „Ж.Р.Х.Ф.О." (1873), а потом в моем сочинении „Об упругости газов", ч. I (1875 г.),[1] а потому я применил этот прибор к нивелированию и назвал его высотомером. Прежде чем приступить к подробному его описанию, считаю необходимым остановиться над выводом полной гипсометрической формулы, лежащей в основании всего учения о барометрическом нивелировании, и над практическими прие-

[1] Сочинения, т. VI, 1939, стр. 221–589. (*Прим. ред.*)

мами нивелирования ртутными барометрами и анероидами, потому что для определения значительных высот выгодно и необходимо применять эти приборы, а мне хотелось придать предлагаемой статье надлежащую полноту.

Гипсометрические формулы

Так как для определения давлений воздуха чаще всего употребляется ртутный барометр, то мы выведем основную гипсометрическую формулу в том предположении, что для барометрического нивелирования употребляется ртутный барометр. При этом предполагается, что ртуть в барометре чистая, т. е., что вес ее кубического сантиметра при 0° равен 13.5959 г; т. е. $s = 13595.9$. Обыкновенно барометры снабжены особым термометром, который должен быть выверен и который показывает температуру ртути. Чтобы его показания были правильны и согласовались с температурой ртути в барометре, необходимо, чтобы термометр этот был сделан из такого же стекла и имел такой же диаметр цилиндрического своего резервуара, какой имеет барометрическая трубка, и сверх того, чтобы термометр был помещен по крайней мере примерно в средине высоты барометра. Тогда можно предполагать, что показания термометра отвечают температуре ртути в барометре. Барометрические показания, наблюденные при некоторой температуре, приводятся к температуре 0° и при выводе гипсометрической формулы мы предполагаем, что полученная барометрическая высота уже исправлена по отношению к температуре ртути в барометре. Сверх того, при определении барометрической высоты необходимо сделать поправку на изменение длины делений той шкалы, которая служит для измерения высоты (см. далее). В этом отношении надо знать коэффициент линейного расширения барометрической шкалы и абсолютную длину ее делений при 0°. Зная это, легко исправить наблюденное показание по отношению к изменениям делений и температуре шкалы. Мы предположим далее, что барометрическая высота, обозначаемая через H, уже исправлена также и в этом отношении. Необходимые практические правила, относящиеся как до упомянутых выше, так и до некоторых других поправок наблюденных барометрических высот, будут далее изложены особо; теперь же мы предположим, что барометрические высоты в точках A и B не только непосредственно определены, но и исправлены во всех отношениях, и притом выражены в метрах.[1]

[1] В тех гипсометрических формулах, где входит только отношение барометрических высот $\frac{H_0}{H_1}$, конечно нет надобности до того, в каких единицах выражены барометрические высоты, но в других формулах входят разности

Если бы воздух представлял однообразную плотность e в пространстве между A и B, то, судя[1] по вышесказанному (I), было бы справедливо следующее выражение:

$$(Z_1 - Z_0)e = q(H_0 - H_1) \quad \ldots\ldots\ldots \text{(II)}$$

Здесь через Z_0 обозначена высота горизонтальной плоскости одной из точек A, где определено давление H_0, а через Z_1 обозначена высота плоскости, проходящей через другую точку B, где определено давление H_1, обе высоты считаются от некоторой плоскости, ниже их лежащей, напр. от уровня океана. Первая часть уравнения показывает, что вес одного кубического метра воздуха e, умноженный на высоту $Z_1 - Z_0$ воздушного столба, представляет вес всего столба воздуха, имеющего в сечении квадратный метр и высоту такую же, какую имеет столб AB. Вторая часть уравнения дает вес столба ртути, уравновешиваемого упомянутым столбом воздуха. Этот вес столба ртути найдется точно так же, как и вес столба воздуха, умножая вес q одного куб. метра ртути на разность высот столбов ртути $H_0 - H_1$ в барометре. Это основное выражение не может быть применено к сколько-нибудь значительной разности высот без большой погрешности, потому что плотность воздуха на разных высотах, а следовательно и под различными давлениями, значительно изменяется, так что в A и B значение e будет не одно и то же, т. е. e не есть величина постоянная. По этой причине предыдущее выражение может служить основным исходом для дальнейших рассуждений только тогда, когда разность высот $Z_1 - Z_0$ будет очень мала, т. е. когда дело будет сведено на бесконечно малые изменения высот и на соответственные им малые изменения давлений. Поэтому вместо конечной разности $Z_1 - Z_0$ должно взять дифференциал высот, т. е. dz_i; точно так же вместо $H_0 - H_1$ должно взять dH_i. Здесь взят знак минус по той причине, что возрастанию высоты отвечает уменьшение давления. Поэтому для определения зависимости изменения высот от изменения давлений получается следующее дифференциальное уравнение, лежащее в основании гипсометрических формул:

$$dz_i = -\frac{q}{e_i} dH_i.^2 \quad \ldots\ldots\ldots \text{(III)}$$

$H_0 - H_1$, и тогда очевидно необходимо условиться в единицах мер, ибо иначе будет разница в постоянных числах формул, а потому мы и делаем вышеуказанное условие.

[1] Для ясности дела напомним, что в формуле I через H_1 и H означены высоты ртути, выражающие давления, умноженные на удельный вес ртути, здесь же чрез H_0, H_1 или вообще чрез H_i выражаются прямо высоты ртутных столбов. Там удельный вес жидкости означен через s, здесь — чрез e.

[2] Иногда при составлении первого дифференциального уравнения в него вводят величину напряжения тяжести. В том виде, как я излагаю дело, очевидно, что этого делать нет нужды, ибо дифференциальные слои ртути и воздуха, коих плотность суть q и e, находятся на одном расстоянии от центра земли.

Если это выражение проинтегрировать, то и получится действительное соответствие между изменениями высот и давлений, составляющее гипсометрическую формулу. Для того чтобы возможно было произвести такого рода интегрирование по z_i и H_i, необходимо, чтобы величины, входящие в дифференциальное уравнение, были или постоянными, или выраженными в зависимости от высот и давлений. Только в этом последнем случае интегрирование возможно. Что касается до величины q, т. е. до веса кубического метра ртути при 0°, то эту величину можно считать постоянною, ибо ее изменения от перемены давлений столь ничтожно малы, что далеко выходят за пределы возможных погрешностей наблюдения. Если с изменением напряжения тяжести меняется вес кубического сантиметра ртути, то во столько же раз совершенно в таком же смысле изменяется и вес кубического сантиметра воздуха e_i, а потому нет надобности вводить в дифференциальном уравнении поправки по отношению к изменению напряжения тяжести в местах наблюдения.

Что же касается до величины e_i, веса кубического метра воздуха, то ее изменения происходят от множества причин, которые мы здесь перечислим и выразим, предполагая, что основные свойства газов читателям известны. Для определения величины e_i прежде всего необходимо знать вес e_0, кубического метра сухого воздуха в килограммах (т. е. отношение между весом кубического метра воздуха и весом килограмма или кубического дециметра воды при 4°) при некоторых определенных условиях, а именно, напр. на уровне океана, под экватором, при 0° и под давлением 0.76 м ртутного столба. Величина эта $e_0 = 1.2893$, судя по опытам Реньо и судя по данным об изменении длины секундного маятника, как то выведено мною в книге „Об упругости газов", ч. I, стр. 66.[1]

[1] В выноске этой страницы ошибочно напечатано $1.2891 + 0.0692 \sin^2 l$, следует быть $1.2890 + 0.00698 \sin^2 l$ или, что применено далее, $1.289\ (1 + 0.00541 \sin^2 l)$. Если сверх того принять во внимание постоянное содержание в воздухе 4 десятитысячных частей (по объему) углекислого газа, то вес одного куб. метра сухого воздуха и будет равен $1.2893\ (1 + 0.00541 \sin^2 l)$, где l означает широты России. Погрешность основного числа 1.2893 зависит от погрешности $= 0.0001$ опытов Реньо и от погрешности определений изменения тяжести с широтою места. Эта последняя, вероятно, гораздо значительнее предшествующей, так что за десятитысячные доли в весе воздуха нельзя ручаться. Изменение напряжения тяжести с широтою места французы чаще всего определяют, исходя из того, что напряжение в Париже равно 9.8088 м, а изменение с широтою $= g\ (1 + 0.00529 \sin^2 l)$ или, что одно и то же, в пределах возможных погрешностей, $\frac{g_{45}}{1 + 0.00265 \cos 2l}$. Выражение $9.78\ (1 + 0.0052 \sin^2 l)$ наилучшим образом отвечает совокупности наблюдений по всей земной поверхности. Применяемая мною функция широты $(1 + 0.0054 \sin^2 l)$ отвечает особенностям в распределении напряжения тяжести в России, судя по наблюдениям Савича, Смыслова и Ленца. За пределами России надежнее применять более общую функцию $(1 + 0.0052 \sin^2 l)$.

Если затем высота места над уровнем океана или географическая широта изменятся, то, вследствие перемены напряжения тяжести, изменится вес кубического метра воздуха, но во столько же раз изменятся и веса кубического метра ртути и воды, а потому в этом отношении не должно делать поправки на величину e_0, если температура и давление остаются те же самые. Если же давление из 0.76 переменится и станет H, то по закону Бойля—Мариотта e_i во столько будет превосходить e_0, во сколько новое давление будет превосходить нормальное давление 0.76 м на уровне океана под экватором. Если мы измерим при географической широте l и при высоте над уровнем океана z_i давление высотою столба ртути H_i метра, то это давление не будет равно давлению H_i на экваторе при уровне океана, потому что напряжения тяжести в этих условиях не одинаковы, и следовательно одинаковые количества ртути будут производить неодинаковые давления. Во сколько раз больше будет напряжение тяжести в данном месте, против экватора, во столько большее давление будет производить один и тот же столб ртути, потому что он будет иметь больший вес. Одно и то же давление будет измеряться всюду одним и тем же давлением пружинных весов, но разными столбами ртути, смотря по напряжению тяжести. Если мы примем за единицу — напряжение тяжести под экватором, то при географической широте l, где земной радиус имеет величину R (м), и при высоте над уровнем океана $=z_0+z_i$ напряжение тяжести будет равно $(1+0.00541\ \sin^2 l)\left(\frac{R}{R+z_0+z_i}\right)^2$, что́ вытекает, во-первых, из наблюдений над изменением длины секундного маятника при переходе от экватора к полюсам, а во-вторых, из закона тяготения, по которому напряжение тяжести обратно пропорционально квадрату расстояния от центра земли. Поэтому, при широте l и на высоте z_0+z_i. столб ртути высотою в H_i будет отвечать давлению, во столько раз большему того давления, которое имел бы столб ртути такого измерения на экваторе, во сколько вышеприведенное выражение больше единицы, а потому если бы то же самое давление, которое выражено при названной широте и высоте через H_i, измерено было под экватором, то оно выразилось бы столбом ртути, равным высотою

$$H_i(1+0.00541\ \sin^2 l)\left(\frac{R}{R+z_0+z_i}\right)^2.$$

А потому, если под экватором кубический метр воздуха, под давлением 0.76 м, весит e_0, то при широте l и высоте z_0+z_i кубический метр воздуха весит во столько раз больше, во сколько указанное давление больше 0.76. Следовательно, если бы температура воздуха была 0° и он был бы совершенно сух, то вес

его куб. метра при давлении H_l, при широте l и высоте от уровня моря z_0+z_l был бы:

$$e_1=e_0\frac{H_l}{0.76}(1+0.00541\sin^2 l)\left(\frac{R}{R+z_0+z_l}\right)^2.$$

Величина R приблизительно $=6\,367\,400$ м (при широте 45°). Обозначим:

$$1+0.00541\sin^2 l=f(l) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (A)$$

Если температура воздуха будет не 0°, как в нормальных условиях, а t_l, то, по закону Гей-Люссака, вес кубического метра воздуха e_2 будет относиться к весу e_1 при 0°, как единица относится к биному $1+kt_l$, где k есть коэффициент расширения воздуха, равный для стоградусного термометра 0.00368.[1] Следовательно:

$$e_2=\frac{e_1}{1+kt_l}=e_0\frac{H_l}{0.76}f(l)\left(\frac{R}{R+z_0+z_l}\right)^2\left(\frac{1}{1+kt_l}\right).$$

Сверх того, воздух в действительности представляет изменчивое содержание влажности, влияющее на его плотность. Количество водяных паров, в воздухе находящихся, может быть измеряемо, как известно, различными способами. Простейшим выражением для влажности воздуха служит определение упругости h_l водяных паров, находящихся в воздухе. Если, напр., для этой цели определяют точку росы, как это делается в гигрометрах Даниеля и Реньо, то, зная упругость, отвечающую температуре точки росы, мы будем знать упругость воздуха, в котором точка росы определена. Так, напр., если точка росы будет определена в —5°, то упругость водяного пара $=0.0031$ м ртутного столба; если точка росы будет 0°, то упругость пара $=0.0046$ м, если точка росы 5°, то упругость $=0.0065$ м, при +10° она $=0.0092°$ м, при 15° $=$ $=0.0127$ м, при 20° $=0.0174$ м ртутного столба. Если для определения влажности служит психрометр Августа и если по этому психрометру наблюдены при этом T температура воздуха и T_1 температура смоченного термометра, то

$$h=f_1-\frac{0.429\,(T-T_1)\,H}{610-T_1},$$

где f_1 — наибольшая упругость, отвечающая температуре влажного термометра. Точнее говоря, результат наблюдений Реньо дал для психрометра формулу вида:

$$h=f_1-A(T-T_1)H,$$

где величина A — постоянное для данного психрометра в определенных условиях. Так, на воздухе и в комнате величина A

[1] Мы принимаем не тот ($k=0.00367$) коэффициент, какой получил Реньо для давлений, близких атмосферному, а число, найденное мною и Каяндером (см. „Ж.Х.Ф.О." 1875 г., кн. 9).*

* Сочинения. т. VI, 1939, стр. 221—589. (*Прим. ред.*)

изменяется для одного и того же прибора. В большинстве метеорологических наблюдений влажность и выражается всегда упругостью h_i водяного пара в воздухе.[1]

Когда выразим влажность этим способом, то очевидно, что все наблюденное давление H_i будет распределяться на две части: на так называемое парциальное давление сухого воздуха и на парциальное давление водяного пара. Первое будет равняться $H_i - h_i$, а второе равняется h_i. При расчете плотности влажного воздуха необходимо знать отношение между плотностями воздуха и водяного пара, дабы определить вес кубического метра влажного воздуха. Непосредственные наблюдения показывают, что если принять плотность воздуха = 1, то плотность водяного пара будет равняться 0.623. Поэтому, при определении e_i, когда имеется влажный воздух, должно подставить вместо давления H_i величину:

$$H_i - h_i + 0.623\ h_i,^2$$

---

[1] Нередко выражают, однако, влажность величиною относительною, которая находится чрез определение отношения между действительно наблюденною упругостью, найденною вышеописанным способом, и тою наибольшею упругостью, которая отвечает температуре воздуха. Эту относительную влажность нередко выражают процентами. Так, напр., если температура воздуха 20° и относительная влажность = 50%, то это значит, что упругость водяного пара в воздухе в этом условии равняется $\frac{50 \cdot 1.74}{100}$ см. Наиболее точным выражением для влажности воздуха должно считать вес воды, содержащейся в некотором объеме воздуха. Химическими способами этот вес непосредственно находится и выражается обыкновенно в граммах на куб. метр воздуха Если знаем упругость водяных паров h и температуру воздуха t, легко вычислить весовое содержание паров в куб. метре, потому что плотность водяного пара по отношению к воздуху известна и = 0.623. Из нее следует, что куб. метр водяного пара при давлении 760 мм при $t°$ весил бы $\frac{0.623 \cdot 1289}{1+kt} = \frac{803}{1+kt}$ г, а потому при упругости h мм вес его будет в граммах на куб. метр:

$$\frac{803\,h}{760\,(1+kt)} = 1.06\,\frac{h}{1+kt}.$$

При обыкновенных температурах бином $1+kt$ близок к коэффициенту 1.06, а потому можно считать, что число граммов пара в куб. метре воздуха равно упругости водяного пара, выраженной в миллиметрах. При t, близкой к 15°, это почти точно, ибо тогда $1+kt$ близко к 1.06.

[2] Это основывается на следующем следствии из закона Дальтона (газы, не действующие химически, смешиваются, не изменяя объема): вес водяного пара в куб. метре воздуха $= \frac{1.06}{1+kt}\,h = \frac{d \cdot e \cdot h}{0.76\,(1+kt)}$, где $d = 0.623$. Вес сухого воздуха, заключающегося в куб. метре влажного воздуха $\frac{e\,(H-h)}{0.76\,(1+kt)}$, следовательно вес куб. метра влажного воздуха = сумме обоих весов

$$\frac{e}{0.76\,(1+kt)} \cdot (H - h + dh).$$

т. е. в вышеприведенной формуле вместо H_i должно поставить величину $H_i - 0.377\, h_i$.

Итак, вес кубического метра влажного воздуха при широте l и высоте $z_0 + z_i$ будет:

$$e_i = e_0 (1 + 0.00541 \sin^2 l) \left(\frac{R}{R + z_0 + z_i}\right)^2 \frac{(H_i - 0.377\, h_i)}{0.76\,(1 + kt_i)} \quad . \quad \text{(IV)}$$

Для ясности повторим указание на значение тех букв, которые входят в эту формулу: l есть широта места или, иначе сказать, угловая высота полюса; $z_0 + z_i$ есть высота над океаном в метрах. Эта величина составлена как сумма из двух высот: той постоянной высоты z_0, которую представляет над уровнем океана низшая точка наблюдения (по условию точка A). Высота эта z_0 при нивелировании должна быть известна чрез предварительные наблюдения или выведена из средней высоты барометра в месте низшего наблюдения. Высота z_i есть та переменная высота над низшею точкой наблюдения, при которой определяется величина e_i и в которой давление есть H_i, температура t_i и упругость водяного пара h_i. Величины z_i, H_i, t_i и h_i меняются от одного слоя воздуха до другого, а потому все снабжены для ясности знаком i. Они суть переменные.

Подставляя определенное таким образом (IV) значение e_i в дифференциальное уравнение (III), получаем следующее основное дифференциальное уравнение:

$$dz_i = -q \cdot \frac{0.76}{e_0 f(l)} \left(1 + \frac{z_0}{R} + \frac{z_i}{R}\right)^2 \frac{1 + kt_i}{H_i - 0.37\, h} \, dH_i, \quad . \quad . \quad . \quad \text{(V)}$$

которое можно легко интегрировать, если t_i и h_i выразить в z_i или H_i, дабы иметь во всем уравнении только две переменные z_i и H_i.

Закон изменения температуры t_i с поднятием z_i в верхние слои атмосферы нельзя считать хорошо известным, главным образом по следующим причинам: 1) хотя имеется значительное число наблюдений, особенно Соссюра, Кемца, Буссенго, Гумбольдта и др. над переменою температуры при восхождении на высокие горы, однако из этих наблюдений нельзя сделать точного вывода для перемен температуры в свободном воздухе, потому что наблюдения такого рода совершаются неизбежно под влиянием лучеиспускания почвы, а от него температура слоев воздуха, лежащих близ почвы, может изменяться. 2) Аэростатические путешествия Гей-Люссака, Глешера, Биксио, Фламмариона и др. показали, что закон изменения температуры с поднятием не отличается постоянством, и в течение различных периодов дня и года закон этот меняется, что особенно очевидно при первых незначительных поднятиях от поверхности земли. В этом последнем случае, как было раньше того известно, нередко температура верхних слоев, в особенности вечером, выше, чем температура нижних слоев

воздуха. 3) Метеорологическое состояние, количество облаков и распределение дождей, ветров и т. п., как показывают опыт и простые соображения, оказывают чрезвычайно большое влияние на ход изменения температуры в разных высотах атмосферы. 4) Наиболее общий метод суждения о законе изменения температуры во всей атмосфере, состоящий в изучении рефракции, хотя может дать законность изменения температур, но однако только в атмосфере сравнительно чистой и спокойной, и особенно ночью, когда производятся астрономические наблюдения, а для гипсометрической практики необходимо знание закона днем и при разных состояниях неба. 5) Теоретические расчеты, могущие относиться только к спокойной атмосфере, должны быть основаны на знании теплоемкостей воздуха и на знании закона изменения влажности в разных слоях, а эти знания далеко еще недостаточны. 6) Термометром наблюдается в обычных условиях температура воздуха близ почвы, и потому зависящая от ее влияния, а закон изменения температур должен относиться к воздуху свободному, далекому от почвы.

Вследствие этих соображений, закон изменения температуры с поднятием нельзя считать ни точно известным, ни постоянным. Результат большинства наблюдений при аэростатических восхождениях показывает однако, что уменьшение температуры идет почти пропорционально уменьшению давления, как это можно видеть, сведя наблюдения, сделанные Глешером в его воздушных восхождениях, что и сообщено мною в октябрьском (1875 г.) заседании Физического Общества (см. „Ж.Р.Х.Ф.О.“, 1875, VII, стр. 260; физ. отд., 1876, вып. 1).[1]

В действительности при гипсометрических наблюдениях определяются температуры воздуха t_0 в точке A и t_1 в точке B. Если принять, что изменения температуры пропорциональны изменению давлений, то на некоторой высоте z_i, где барометрическое давление будет H_i, температура будет t_i и она будет выражаться по указанной эмпирической зависимости следующим образом:

$$t_i = a + bH_i,$$

где a и b суть постоянные числа. Эти последние легко определить, зная, что при H_0 температура $= t_0$, а при H_1 она равна t_1; поэтому

$$t_0 = a + bH_0,$$

$$t_1 = a + bH_1,$$

откуда:

$$a = \frac{t_1 H_0 - t_0 H_1}{H_0 - H_1}, \qquad b = \frac{t_0 - t_1}{H_0 - H_1} \quad \ldots\ldots\ldots (B)$$

[1] См. выше, стр. 15—20. (*Прим. ред.*)

Хотя бы эмпирический закон: $t_i = a + bH_i$ пропорциональности изменений температуры с изменением давления был и не вполне точен, однако он не может быть далек от истины, если температура t_0 последовательно переходит в температуру t_1. В нашем случае вышеприведенная гипотеза значительно упрощает дальнейшее рассуждение, а потому ее весьма выгодно применить к делу, тем более, что она близка и к действительности. Надо заметить, что Лаплас, Бессель и другие исследователи в вопросе о гипсометрической формуле держались гипотез, в сущности не проверенных опытом. Так, считая $t_i = a + bz_i$, легко можно интегрировать уравнение (V), но предположение о пропорциональности температур высотам дальше от истины, чем моя гипотеза: обе в частных случаях приводят к числам (высотам), весьма между собою близким.

То же самое, что об изменении температуры с поднятием или с изменением давления, должно сказать об изменении упругости водяного пара с поднятием или уменьшением давления.

Количество обработанных сведений об изменении влажности в различных слоях атмосферы еще менее значительно, чем количество сведений об изменении температуры. Но влияние изменчивого содержания влажности на плотность воздуха имеет меньшее значение, чем влияние температуры, т. е. плотность воздуха меньше изменяется от встречающихся в практике перемен влажности, чем от температур. Это касается до определения и малых, и больших высот, потому что на больших высотах температура значительно низка, и следовательно количество могущих содержаться в воздухе водяных паров (величина h_i) становится весьма незначительным. Вообще говоря, влияние влажности на вес воздуха мало ощутительно и возрастает только тогда, когда температуры воздуха высоки. По указанным причинам, содержание влажности или, правильнее сказать, упругость водяных паров можно принять изменяющеюся по некоторой простой и удобной для расчета зависимости от высот или давлений и от этого результат мало изменится. Часто вовсе не принимается во внимание влажность.

Чтобы достигнуть наибольшего удобства в интегрировании, примем, что во всех слоях воздуха существует такое постоянное отношение между упругостью пара h_i и давлением воздуха H_i, которое составляет арифметическое среднее между отношением в верхней и нижней точках наблюдения, т. е. среднее

$$\frac{h_i}{H_i} = \frac{1}{2}\left(\frac{h_0}{H_0} + \frac{h_1}{H_1}\right).$$

Для целого столба воздуха это близко к действительности, как видно из многочисленных данных, собранных Глешером в его воздушных путешествиях.

Итак уравнение (V) после вышеуказанных допущений примет вид, удобный для интегрирования:

$$dz_i = -\frac{q\cdot 0.76}{e_0 f(l)} \cdot \frac{1}{1-\frac{0.377}{2}\left(\frac{h_0}{H_0}+\frac{h_1}{H_1}\right)}\left(1+\frac{z_0}{R}+\frac{z_1}{R}\right)^2 \cdot \frac{1+ka+kbH_i}{H_i}\,dH_i \quad \text{(VI)}$$

Обозначим через N постоянное:

$$\frac{q.0.76}{e_0 f(l)} \cdot \frac{1}{1-0.1885\left(\frac{h_1}{H_1}+\frac{h_0}{H_0}\right)}\left(1+\frac{2z_0}{R}\right)=N \quad \text{(D)}$$

Примем затем во внимание, что R гораздо более не только z_0, но и z_i, а потому совершенно удовлетворительно, в пределе возможных точностей, должно считать:

$$\left(1+\frac{z_0}{R}+\frac{z_i}{R}\right)^2 = \frac{1+\frac{2z_0}{R}}{1-\frac{2z_i}{R}}.$$

Поэтому уравнения (V) и (VI) принимают вид:

$$\left(1-\frac{2z_i}{R}\right)dz_i = -N(1+ka)\frac{dH_i}{H_i} - Nkb\cdot dH_i.$$

По интегрировании оно даст уравнение:

$$z_i\left(1-\frac{z_i}{R}\right) = -N(1+ka)\ln H_i - NkbH_i + C.$$

Подставив вместо z_i и H_i частные их значения z_1 и H_1, а также z_0 и H_0, получим два уравнения:

$$z_1\left(1-\frac{z_1}{R}\right) = -N(1+ka)\ln H_1 - NkbH_1 + C\cdot$$

$$z_0\left(1-\frac{z_0}{R}\right) = -N(1+ka)\ln H_0 - NkbH_0 + C.$$

Вычитая соответственные части их одну из другой, пользуясь затем вышеприведенным замечанием о том, что $R > z_i$, и обозначая искомую разность $z_1 - z_0$ через z (это значит, что $z_1 = z_0 + z$), получаем:[1]

$$z = N\left(1+\frac{2z_0+z}{R}\right)\left[1+ka+kb\frac{H_0-H_1}{\ln\frac{H_0}{H_1}}\right]\ln\frac{H_0}{H_1} \quad \text{(VII)}$$

---

[1] Вычитание первой части дает: $z_1 - z_0 - \frac{z_1^2 - z_0^2}{R}$. Эта величина равна $z\left(1-\frac{z_1+z_0}{R}\right)$, или $z\left(1-\frac{2z_0+z}{R}\right)$ или очень приближенно $\frac{z}{1+\frac{2z_0+z}{R}}$, что и введено в (VII).

Величина, входящая множителем при kb, может быть легко преобразована, потому что

$$\ln\frac{H_0}{H_1}=2\left(\frac{H_0-H_1}{H_0+H_1}\right)+\frac{2}{3}\left(\frac{H_0-H_1}{H_0+H_1}\right)^3+\frac{2}{5}\left(\frac{H_0-H_1}{H_0+H_1}\right)^5+\ldots+\ldots \quad (E)$$

При расчете можно ограничиться первым членом этой быстро сходящейся строки (ибо $H_0>H_1$). Действительно, если $H_0=750$, а $H_1=500$ мм, то $\ln\frac{H_0}{H_1}=0.4055$, первый член строки=0.4000, второй=0.0053, т. е. составляет, даже при столь значительной, как в нашем примере, разности H_0-H_1, не более 1.4%. Ограничившись первым членом, имеем:

$$\frac{H_0-H_1}{\ln\frac{H_0}{H_1}}=\frac{H_0+H_1}{2}.$$

Приняв это, а также подставляя в (VII) значения (B) и (D), после соответственного упрощения получается окончательное выражение:

$$z=\frac{13596\cdot0.76}{1.2893}\cdot\frac{1+\frac{z+4z_0}{6366200}}{1+0.00541\sin^2 l}\cdot \cdot\frac{\left[1+0.003684\frac{t_0+t_1}{2}\right]}{1-0.1885\left(\frac{h_0}{H_0}+\frac{h_1}{H_1}\right)}\ln\frac{H_0}{H_1} \quad (VIII)$$

Численное значение первого множителя:

$$K_0=\frac{13596\cdot0.76}{1.2893}=8014.4\ (\lg K_0=3.90387) \quad (F)$$

Число это известно под названием *барометрического или гипсометрического постоянного*. При широте в 45° оно=7992.7.[1] У полюсов $K_{90}=7971.3$.[2] Физическое его значение есть: $\frac{dz}{dH}=-\frac{K}{H}$, если $t=0$, т. е. высота в метрах, отвечающая пере-

[1] Когда подставляют число K_{45}, то $f(l)$ выражают в форме $1-0.0027\cos 2l$, основываясь на том, что $1+a\sin^2 l=1+\frac{a}{2}-\frac{a}{2}\cos 2l$. Очевидно, что $K_{45}=K_0\left(1+\frac{a}{2}\right)$, а потому: $\left(\frac{K_0}{1+a\sin^2 l^3}\right)=\frac{K_{45}}{\frac{-a}{2a}\cos 2l}=$ почти $K_{45}\left(1+\frac{a}{2}\cos 2l\right)$.

[2] Должно заметить, что величину $a=0.00541$ в $f(l)$ мы взяли ту, которая вытекает из данных для России, по наблюдениям Савича, Ленца и Смыслова. Обыкновенно принимают $a=0.0053$ или 0.0054 (стр. 69).

[3] У автора опечатка asinl 2

мене давления на единицу высоты ртутного столба, прямо пропорциональна K и обратно пропорциональна давлению. Иначе можно сказать, что K выражает ту высоту, которую имела бы атмосфера, если бы воздух весь имел такую плотность, какую имеет при 0° и при давлении 0.76 м, считая от того места, где давление=0.76 м.

Второй множитель (VIII) выражает влияние перемены напряжения тяжести, смотря по географической широте места l и по высоте нижней точки наблюдения над уровнем океана. Весь этот множитель $\varphi(l, z)$ мало отличается от единицы и может быть с полным правом (для широт от 65° до 25°) приравнен выражению (l выражено в градусах, z — в метрах):

$$[1+0.000000157\ (z+4z_0)]\cdot[1+0.0000907\ (75-l)]\ 0.99459.$$

Притом должно заметить, что $K_0 0.99459 = K_{90}$, т. е. равно значению барометрического постоянного на полюсе. Третий множитель формулы (VIII) показывает влияние температуры и упругости водяного пара. Он также близок к единице и тем более отличается от нее, чем более температуры далеки от 0°, но взяв высшие возможные температуры, а именно: $\frac{t_0+t_1}{2}=30°$ и полагая $\frac{h_0}{H_0}+\frac{h_1}{H_1}=0.08$, все же значение его не более 1.13. Его с полным правом можно выразить произведением:

$$\left[1+0.003684\,\frac{t_0+t_1}{2}\right]\cdot\left[1+0.1885\left(\frac{h_0}{H_0}+\frac{h_1}{H_1}\right)\right].$$

Подставив соответственные значения в (VIII) и обозначив чрез z произведение $K_0 \ln \frac{H_0}{H_1}$, т. е. непоправленную высоту z, определенную только по данным для давлений, получаем следующее весьма удобное для расчета уравнение:

$$z=\left\{\begin{array}{ll} +7971.3 \ln H_0 & \text{Эта разность = приближенной высоте } (z) \text{ в метрах} \\ -7971.3 \ln H_1 & \\ +(z)\ 0.000000157\ (z+4z_0) & \text{Влияние высоты.} \\ +(z)\ 0.0000907\ (75-l) & \text{Влияние географической широты.} \\ +(z)\ 0.003684\,\frac{t_0+t_1}{2} & \text{Влияние температуры.} \\ +(z)\ 0.188\left(\frac{h_0}{H_0}+\frac{h_1}{H_1}\right) & \text{Влияние влажности.} \end{array}\right. \qquad (IX)$$

В этой форме гипсометрическая формула легко рассчитывается, заметив, что натуральный $\ln H = 2.30258 \lg H$, а потому $7971.3 \ln H = 18220 \lg H$.[1]

[1] В подобной форме делается расчет французами, причем руководством чаще всего служат таблицы Матье, помещающиеся в „Annuaire pour l'an 18.. publié par le Bureau des longitudes". Числа Матье [K_{45} а.в $f(l)$ и др.] отли-

Формуле (VIII) легко придать вид,[1] в котором она очень скоро рассчитывается, при помощи таблиц обыкновенных логарифмов, потому что она преобразуется следующим образом:

$$z = 2.30258\, K_0 \lg \frac{H_0}{H_1}\left[\left(1+0.0029 \lg \frac{H_0}{H_1}\right)\left(1+\frac{z_0}{1591500}\right)\cdot\right.$$
$$\cdot\left(1+0.003684\,\frac{t_0+t_1}{2}\right)\left(1+0.377\,\frac{1}{2}\,\frac{h_0}{H_0}+\frac{h_1}{H_1}\right)\cdot$$
$$\left.\cdot\left(\frac{1}{1+0.00541\,\sin^2 l}\right)\right] \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (X)$$

Обозначая чрез P величину $\lg \frac{H_0}{H_1}$, а пять множителей близких к 1 (заключенные в квадратные скобки) — через $\varphi(P)$, $\varphi(z_0)$, $\varphi(t)$, $\varphi(h)$ и $\varphi(l)$, и замечая, что $\lg 2.30258\, K_0 = 4.26608$, получаем:

$$\lg z = 4.26608 + \lg P + \lg \varphi(P) + \lg \varphi(z_0) + \lg \varphi(t) + \lg \varphi(h) - \lg \varphi(l).$$

Для того чтобы не иметь вычитаемого, преобразуем это уравнение в следующее, и располагая члены по их значению, имеем:

$$\lg z = 4.25000 + \lg P \underbrace{+\lg \varphi(t)}_{\text{Табл. A}} + \underbrace{0.01608 - \lg \varphi(l)}_{\text{Табл. B} = \varphi_1(l)} + \underbrace{\lg \varphi(h)}_{\text{Табл. C}} + \underbrace{\lg \varphi(P)}_{\text{Табл. D}}$$
$$+ \underbrace{\lg \varphi(z_0)}_{\text{Табл. E}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (XI)$$

Для нахождения $\lg z$ должно поэтому поступить так: сперва отыскать $\lg H_0 - \lg H_1 = P$ и взять затем $\lg P$, потом по средней температуре $\frac{t_0+t_1}{2}$ найти в таблице A (см. далее) значение $\lg \varphi(t)$, в таблице B по величине l определить $\varphi_1(l) = 0.01608 - \lg \varphi(l)$, в таблице C по величине $\frac{1}{2}\left(\frac{h_0}{H_0}+\frac{h_1}{H_1}\right)$, которую назовем $\frac{h}{H}$, найти соответственную величину $\lg \varphi(h)$, по таблице D, зная значение P, найти $\lg \varphi(P)$ и, наконец, по высоте z_0 нижней станции над океаном найти в таблице E $\lg \varphi(z_0)$. Все эти величины логарифмов должно сложить между собою и с числом 4.25000. Сумма эта даст $\lg z$. Все числа таблиц A, B, C, D, E

чаются от более новых, принимаемых мною. Кроме того у Лапласа и Матье не принята влажность, K взято для 45° и т. п.

[1] За Гауссом, Бессель, Плантамур и многие придавали гипсометрическим расчетам этот или подобный ему вид. Наиболее совершенную форму и лучшие постоянные числа стали употреблять после Плантамура, а в последнее время явилось много таблиц для барометрической формулы. Приводимые мною таблицы вновь разочтены мною для формулы X и отличаются от других тем: 1) что для изменения напряжения тяжести приняты числа, найденные (и применимые) в России; 2) что коэффициент расширения воздуха взят, найденный мною; 3) самой формуле (VIII) придан вид несколько иной, чем у других.

Таблица А

Значения логарифмов (в 5 цифр) $\varphi(t) = \lg\left(1 + 0{:}003684\frac{t_0 + t_1}{2}\right)$

Аргумент средняя температура $t = \frac{t_0 + t_1}{2}$ по Цельсию

Δ — разность, отвечающая 1°

											Δ от	Δ до
t	*−10°*	*−9°*	*−8°*	*−7°*	*−6°*	*−5°*	*−4°*	*−3°*	*−2°*	*−1°*	166	160
lgφ (*t*)	−1630	−1464	−1299	−1134	− 971	− 807	− 645	− 483	− 321	− 160		
t	*1°*	*2°*	*3°*	*4°*	*5°*	*6°*	*7°*	*8°*	*9°*	*10°*	160	154
lgφ (*t*)	+ 160	+ 319	+ 477	+ 635	+ 793	+ 949	+1106	+1261	+1417	+1571		
t	*11°*	*12°*	*13°*	*14°*	*15°*	*16°*	*17°*	*18°*	*19°*	*20°*	154	149[1]
lgφ (*t*)	+1725	+1879	+2032	+2184	+2336	+2487	+2638	+2788	+2938	+3087		
t	*21°*	*22°*	*23°*	*24°*	*25°*	*26°*	*27°*	*28°*	*29°*	*30°*	148	144
lgφ (*t*)	+3236	+3384	+3532	+3679	+3826	+3972	+4118	+4263	+4409	+4552		

[1] В подлиннике опечатка „144". (*Прим. ред.*)

даны для пятизначных логарифмов и без нулей, стоящих впереди, так, например, что число 27 отвечает 0.00027.

Таблица B

Значения $\varphi_1(l) = 0.01608 - \lg \varphi(l)$, где $\varphi(l) = (1 + 0.00541 \sin^2 l)$
Аргумент l географическая широта места в градусах

l	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°
$\varphi_1(l)$	1606	1601	1592	1581	1566	1549	1531	1511
	На 1°	1	2	2	3	3	4	4
l	45°	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°
$\varphi(l)$	1491	1471	1451	1432	1416	1401	1389	1381
	На 1°	4	4	4	3	3	2	2

Приводим для ясности пример. Средние за 10 лет (от 1864 до 1873) числа для Невшателя (в Швейцарии) суть: барометр при 0°=718.84 мм, температура +9.°095 Ц.; относительная (в процентах) влажность 78.4.[1] Высота над уровнем океана= =488 м, широта места 47°0′, поэтому:

$$\lg H_0 = 2.85663; \quad t_0 = 9.095; \quad \frac{h_0}{H_0} = \frac{6.75}{718.8} = 0.00939; \quad z_0 = 488.$$

Вблизи Невшателя лежит возвышенное над ним место, называемое Шомон. Там, как и в Невшателе, давно ведутся постоянные метеорологические наблюдения и в период тех же лет там средние суть: для барометра при 0°=663.97, температура +5.°622, относительная влажность 83.0%, а потому:

$$\lg \varphi H_1 = 2.82215; \quad t_1 = 5.°622; \quad \frac{h_1}{H_1} = \frac{5.66}{664.0} = 0.00852; \quad l = 47°.$$

Отсюда находим: $P = \lg H_0 - \lg H_1 = 0.03448$; $\lg P = 0.53757-2$; по таблице D, соответственно величине P, находим для $\lg \varphi(P^2)$ число +4, по таблице E, по высоте z_0 находим число +12; в таблице A, по величине $\frac{t_0 + t_1}{2} = 7.°36$, находим число +1162; [2] по таблице C, зная, что $\frac{1}{2}\left(\frac{h_0}{H_0} + \frac{h_1}{H_1}\right) = 0.00895$, найдем $\lg \varphi\left(\frac{h}{H}\right) =$

[1] Лучше было бы взять среднюю упругость паров за весь год, но эти числа не имеются в моем распоряжении.

[2] В этой таблице даны разности Δ, отвечающие 1°. Они позволяют рассчитывать значение числа для долей градуса.

$= +146$. Наконец, по таблице B и величине l находим число 1483. Здесь, как и в других случаях, первые 4 слагаемых преобладают над остальными тремя (по C, D и E).

Искомый $\lg z$ найдется по (XI) сложением:

		4.25000
	$+\lg P$	0.53757—2
Табл. A	$+\lg\varphi_1(t)$	0.01162
„ B	$+\lg\varphi(l)$	0.01483
„ C	$+\lg\varphi(h)$	0.00146
„ D	$+\lg\varphi(P)$	0.00004
„ E	$+\lg\varphi(z_0)$	0.00012

$= \lg z = 2.81564.$

Отсюда $z = 654.1$ м

Таблица C

Значения логарифма (в 5 цифр) $\varphi(h) = \lg\left[1 + 0.377\left(\frac{h_0}{H_0} + \frac{h_1}{H_1}\right)\frac{1}{2}\right]$

Аргумент $1000\,\frac{h}{H} = \frac{1000}{2}\left(\frac{h_0}{H_0} + \frac{h_1}{H_1}\right)$ — среднее отношение упругостей пара воды к атмосферному давлению,[1] умноженное на 500

$\frac{h}{H}$ 1000	5	10	15	20	Каждой тысячной доле $\frac{h}{H}$ отвечает в логарифме величина 16.3
$\lg\varphi(h)$	+83	+163	+245	+326	

[1] Если упругость паров h_0 или h_1 не наблюдалась, то о ней можно приблизительно судить по двум признакам: 1) по температуре воздуха, которая определяет наибольшую возможную упругость пара, и 2) по состоянию погоды: дождливое и сырое время, утром и вечером, особенно зимой, относительная влажность более 80%. Только среди дня, и особенно летом, она бывает менее 60%. Вообще в среднем она около 80%. О наибольшей возможной упругости можно судить по таблице, прилагаемой в конце сочинения.

Таблица D

Значения логарифма (в 5 цифр) $1 + 0.0029\lg\frac{H_0}{H_1}$ или $\lg\varphi(P) = \lg(1+0.0029P)$

Аргумент $P = \lg H_0 - \lg H_1$

P	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
$\lg\varphi(P)$	+1	+2	+4	+5	+6	+7	+9	+10	+11
P	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
$\lg\varphi(P)$	+13	+19	+25	+32	+38	+44	+50	+56	+63

Таблица E

Значения логарифма (в 5 цифр) $\varphi(z_0) = \lg\left(1+\frac{z_0}{1\,591\,000}\right)$

Аргумент z_0 в метрах или высота нижней станции над уровнем моря[1]

z_0	*100*	*200*	*300*	*400*	*500*	*600*	*700*	*800*	*900*
$\lg\varphi(z_0)$	+3	+5	+8	+11	+13	+16	+19	+22	+25
z_0	*1000*	*1500*	*2000*	*2500*	*3000*	*3500*	*4000*	*4500*	*5000*
$\lg\varphi(z_0)$	+27	+41	+55	+68	+81	+95	+109	+123	+136

[1] Если величина z_0 неизвестна, то ее можно приблизительно узнать по высоте барометра на низшей точке наблюдения, считая, что на уровне моря, при той же широте, барометрическое давление равно 760 ± небольшая величина, зависящая от широты места. Лучше, конечно, если для этой цели послужит среднее барометрическое давление долгого периода.

Вывод гипсометрической формулы, сделанный выше, по существу не отличается от обычного способа вывода (Лапласа и др.), но в нем яснее, чем во многих известных мне, выражено влияние каждого обстоятельства, влияющего на высоту, определяемую гипсометрически. Формула Лапласа, выведенная им в „Mécanique céleste" (т. IV), представляет ту особенность, что в нее входит влажность, а как через то для z получается величина, меньшая надлежащей (ибо влажность делает воздух более легким), то, как бы взамен этого, в формулу Лапласа введен больший коэффициент расширения воздуха, а именно температурный множитель принят равным

$$\varphi(t) = \left[1+\frac{2(t_0+t_1)}{1000}\right] \quad \text{или} \quad 1+0.004\,\frac{t_0+t_1}{2}$$

вместо $1+0.00368\,\frac{t_0+t_1}{2}$.

Такое упрощение довольно распространено в практике и, как мы увидим далее, имеет за себя не только практическую выгоду, но и некоторое теоретическое оправдание, хотя включено Лапласом только по указанной выше причине.

За Лапласом выступил целый ряд других исследователей, старавшихся так или иначе ввести в гипсометрическую формулу влияние влажности. Наибольшую известность между предложенными формулами получила данная Бесселем в „Astronomische Nachrichten" (№№ 356, 357, 1838). Вывод Бесселя запутан, и его результат не лучше, чем Лапласа, даже при измененных коэффициентах, что сделал Плантамур. Между гипсометрическими фор-

мулами заслуживает затем разбора только формула, данная Бабине в 1850 г. (Comptes rendus, XXX, 309), но только потому, что она имеет простоту чрезвычайную:

$$z = 16000\,\frac{H_0 - H_1}{H_0 + H_1}\left[1 + \frac{2\,(t_0 + t_1)}{1000}\right] \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (XII)$$

Изменения l, z_0 и h не приняты во внимание, потому что они незначительно меняют z. Термометрический множитель такой же, как у Лапласа. Главный множитель $16000\,\frac{H_0 - H_1}{H_0 + H_1}$ происходит из произведения $K_{45} \ln \frac{H_0}{H_1}$, пользуясь разложением натурального логарифма в строку, вышеприведенную под знаком (E), и ограничиваясь первым приближением. Так как сумма отбрасываемых членов представляет величину положительную, то, ставя вместо $\ln \frac{H_0}{H_1}$ величину $2\frac{H_0 - H_1}{H_0 + H_1}$, получим меньшую высоту z. Число 16 000 есть округление числа $2K_{45}$, которое равно 15 985. Число это увеличено в виду того, что значение $2\,\frac{H_0 - H}{H_0 + H_1}$ меньше, чем $\ln \frac{H_0}{H_1}$. Для небольших высот и вблизи 45° широты формула Бабине дает результат не менее удовлетворительный, чем все другие обычные формулы. Ее (XII) можно вывести и непосредственно из следующих соображений, которые не имеют в себе существенных недостатков.

Столб ртути, высотою $H = H_0 - H_1$, уравновешивает столб воздуха высотою z. Средняя плотность ртути q; называя среднюю плотность воздуха e, имеем:

$$(H_0 - H_1)\,q = ze.$$

Чтобы найти среднюю плотность e, исходим из совокупности законов Мариотта и Гей-Люссака, т. е. из выражения $e = \frac{e_0}{0.76} \cdot \frac{H}{(1+kt)}$, и сочтем, что среднее давление $= \frac{H_0 + H_1}{2}$ и средняя температура $\frac{t_0 + t_1}{2}$ определяют среднюю плотность e, а потому имеем:

$$(H_0 - H_1)\,q = z\,\frac{e_0}{0.76} \cdot \frac{\frac{H_0 + H_1}{2}}{1 + k\,\frac{t_0 + t_1}{2}},$$

откуда:

$$z = \frac{q \cdot 2 \cdot 0.76}{e_0} \cdot \frac{H_0 - H_1}{H_0 + H_1}\left(1 + k\,\frac{t_0 + t_1}{2}\right) =$$

$$= K_{45}\,\frac{2}{H_0 + H_1}\,(H_0 - H_1)\,\varphi(t) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (XIII)$$

Подставив вместо $q = 13\,596$ и $e_0 = 1\,293$ их величины, получим формулу Бабине, которая поэтому заключает в себе определенную гипотезу о средней плотности воздуха. Гипотеза эта недалека от истины, и должно заметить, что при выводе всяких других гипсометрических формул нельзя избежать гипотез, более или менее произвольных. Перечисляем те, которые положены в основание как вышеприведенной формулы (VIII), так и всяких других гипсометрических формул.

1) Барометрическое давление есть гидростатическое, т. е. пропорционально весу жидкости, давящей на барометр.

2) Закон Мариотта точно применим к воздуху.

3) Атмосфера находится в покое и однородна по своему химическому составу, по крайней мере по газам.

4) Сверх того, в вывод необходимо включить гипотезы о законе изменения t и h с переменою H или z.

Строго говоря, ни одна из этих гипотез не верна абсолютно, а потому опыт должен решить степень применимости гипсометрических формул к действительным измерениям. Эту задачу старались выполнить многие, поступая четырьмя способами.

1) Высота горы B над известным местом A определялась тригонометрически, т. е. угломерными приборами и измерением длины базиса,[1] а затем на горе B и в месте A производился ряд единовременных барометрических наблюдений, иногда в разные периоды года и дня при разных погодах. Затем найденные гипсометрически высоты сличались с тригонометрическими определениями. Так поступало большинство исследователей прошлого и начала нынешнего столетия. Наиболее известны в этом отношении работы Рамона в Пиринеях, Обюсона на Monte-Gregorio и прочих. Способ этот указал, что барометрическое постоянное лапласовской формулы должно быть изменено против того, которое дают наблюдения над q (вес куб. меры ртути) и e_0 (вес куб. меры воздуха). Старались определить практическую величину K, но попытки этого рода нельзя считать удовлетворительными.[2] Метод этот страдает по существу тем, что заключает в себе данные, поправляемые на рефракцию, а потому, если не было произведено единовременных наблюдений из A в B и из B в A, то всегда будет сомнение в точности

[1] При этом способе измерения значительная точность может быть достигнута только при надлежащей поправке зенитальных расстояний на земную рефракцию, а это достигается или при близости мест наблюдения к горе (тогда зенитальные расстояния малы и рефракция мала и точно известна), или при единовременном наблюдении зенитальных расстояний из A на B и из B на A (тогда рефракция точно элиминируется). Лучшие наблюдения относятся к послеполуденному времени, когда изображение предмета становится спокойным.

[2] Рамон из 800 наблюдений, соответствующих нивелированию, вывел, что $K_{45} 2.30258 = 18336$, откуда $K_{45} = 7963$ (вместо 7993). Это число применяется часто и до сих пор в формуле Лапласа.

основного числа. Но эти разности, зависящие от рефракции, обыкновенно гораздо менее разностей, замечаемых между высотами, получаемыми по барометрическому расчету.

2) Многократно испытывали барометрическую формулу, сравнивая метеорологические данные за долгий период времени в местах, более или менее удаленных. Так, например, из местностей России в этом отношении известны сличения между Екатеринбургом и С.-Петербургом, сделанные Галле, между Азовским и Каспийским морями — Е. Ленцом и между Варшавою и Краковом — Стечковским. Обычный результат таких сличений тот, что в разное время года и дня получаются весьма различные высоты.[1] Эрман в обширной статье старался найти причины различий и сводит дело к тому, что, избирая несколько станций с определенным положением и с известною разностью высот, по ним для данного момента находит эмпирический закон отступлений от гипсометрической формулы, а затем этот закон прилагает к определению разности высот таких мест, для которых она неизвестна и где в то же время сделаны наблюдения. Метод этот не только продолжителен и неприложим в большинстве случаев, но и основывается на гипотезе о равномерности метеорологических изменений на разных высотах, что опытом не подтверждается. Во всяком случае определение высот по барометру для отдаленных мест неверно, и нет ручательства верности даже тогда, когда будут взяты средние за многие годы.

3) Для проверки гипсометрических формул можно определить в данном столбе воздуха плотности его на разных высотах (наблюдая H, t и h) и таким образом узнать среднюю плотность всего столба воздуха между A и B, и тогда по разности давлений можно определить и высоту, основываясь на гидростатическом законе (1). Найденную таким образом высоту должно сличить с определенною по формуле. Аэростатические восхождения с данными, столь полно собранными, как у Вельча и Глешера, дают полную для того возможность. Этот путь проверки выполнен был мной, но я узнал,[2] что Эллис уже раньше того пришел к тому же способу и нашел, например, для двух восхождений Глешера высоты:

По формуле	По средней плотности	Разность
26039 фут.	25688 фут.	351
37427 „	36659 „	768

[1] Это происходит от того, что изобары, или линии, соединяющие на земле те места, где барометрическое давление одинаково, имеют в разные времена различные направления. Этот предмет в новейшей метеорологии разработан с большою полнотой. Основные данные можно найти в метеорологии Мона, которая вскоре появится в русском переводе.

[2] Из статьи проф. Ковальского об астрономической рефракции, которую он обязательно прислал мне.

Различие зависит от неточности гипотез, лежащих в основании формул, и от величины постоянных, входящих в формулы. Путь этот обещает дать весьма полезные результаты для проверки гипсометрических формул, но здесь нельзя долго останавливаться на этом маловыработанном приеме.

4) Самый плодотворный и точный способ для той же цели дают сличения метеорологических наблюдений при подошве горы и на ее вершине, если разность высот измерена геодезическим нивелированием и если расстояние мест наблюдения невелико. Путь этот впервые применен в обширных размерах Рамоном между Пик-дю-Миди и Тарбесом. Одни утренние наблюдения дали, при разности высот 2613 м, различия, превышающие 116 м, т. е. погрешность доходит до $\pm 2.5\%$. Наблюдения одного дня в разные часы часто давали различия в одну и ту же сторону, иногда в разные стороны. При этом должно заметить, что расчет производился по формуле, в которой K взято среднее из наблюдений того же Рамона, следовательно об абсолютной величине отступлений нельзя было сделать никакого суждения. Кемц сделал ряд подобных же сличений данных для Риги и Фаульгорна с данными для Люцерна, Цюриха и Женевы, но наблюдения были тогда и малочисленны, и неполны.

Плантамур в своих известнейших исследованиях, относящихся до климата Женевы и С. Бернара, постоянно делает такие сличения, и это длится уже много лет (см. ежег. Bibliothèque Universelle de Genève).

Приводим для примера средний вывод 1870 года:

	Средняя разность $H_0 - H_1$ мм	Полдень	4 часа дня	8 часов вечера	Полночь	4 часа утра	8 часов утра
Зима (декабрь—февраль) .	166.20	—0.01	—0.35	—0.07	+0.10	+0.07	+0.23
Весна (март—май)	163.77	—0.01	—0.75	—0.32	+0.05	+0.42	+0.65
Лето (июнь—август) . .	159.24	—0.06	—0.82	—0.44	+0.12	+0.52	+0.68
Осень (сентябрь—ноябрь) .	162.47	—0.11	—0.60	—0.09	+0.19	+0.24	+0.40
Год 726.55—563.65	162.90	—0.05	—0.64	—0.20	+0.12	+0.32	+0.50

К этим данным для того же времени 1870 г. прибавляется ход изменения температуры.

		Средняя температура Ц.	Полдень	4 часа дня	8 часов вечера	Полночь	4 часа утра	8 часов утра
Зима	Женева	+ 0.22	+ 2.06	+ 2.07	+ 0.36	— 0.77	— 1.36	— 1.25
	С.-Бернар	— 9.33	— 7.92	— 8.61	— 9.71	— 9.87	—10.11	— 9.84
Весна	Женева	+ 9.52	+12.29	+13.37	+10.21	+ 7.72	+ 5.19	+ 8.47
	С.-Бернар	— 2.61	+ 0.06	— 0.23	— 3.34	— 4.11	— 5.10	— 2.62
Лето	Женева	+19.04	+23.33	+23.55	+19.76	+16.70	+14.05	+18.24
	С.-Бернар	+ 5.78	+ 8.26	+ 7.42	+ 5.42	+ 4.42	+ 3.18	+ 6.00
Осень	Женева	+ 9.39	+11.53	+11.94	+ 9.71	+ 8.09	+ 6.55	+ 8.35
	С.-Бернар	— 1.19	+ 0.71	— 0.18	— 1.45	— 2.11	— 2.64	— 1.52
Год	С.-Бернар	— 1.80	+ 0.32	— 0.35	— 2.23	— 2.88	— 3.63	— 1.96
	Женева	+ 9.59	+12.05	+12.79	+10.07	+ 7.98	+ 6.15	+ 8.51

Влажность наблюдалась только в Женеве, а потому мы ее и не приводим. По средней годовой относительной влажности, в Женеве 73% и на С.-Бернаре 76%, Плантамур выводит по данным для всего года высоту 2069.8 м вместо 2070.3 м, найденных непосредственным нивелированием. Для 1865 г. найдена из данных высота 2065.9 м, для 1866 г. — 2065.5 м, для 1867 — 2066.8 м, для 1868 — 2070.8 м, для 1869 — 2070.9 м. В среднем из многих лет получается для данных С.-Бернара и Женевы меньшая высота, чем в действительности, а именно 2066 вместо 2070 м. Эти сличения пользуются наибольшею известностью, но в них есть два существенных и устранимых недостатка: а) Женева и С.-Бернар лежат довольно далеко друг от друга. Долготы их разнятся во времени на 4 минуты, а широты суть: 46°12′ и 45°52′; b) при таком расстоянии сверх того между ними лежат большое озеро и высокие горы (отроги Монблана), а потому лучше избирать для сличений пункты, ближайшие один к другому; c) на С.-Бернаре влажность не наблюдается.

Большою известностью затем пользуются наблюдения, сделанные Бауэрнфейндом в Баварии на пяти нивелированных пунктах горы Grosse Miesing (l — 47°40′). Они описаны в его сочинении

„Beobachtungen und Untersuchungen über die Genauigkeit barometrischer Höhenmessungen“ (München, 1862). Средние данные, приведенные вслед за сим, взяты для каждой станции из 100 наблюдений, произведенных единовременно с 8 ч. утра 22 августа до 6 ч. вечера 27 августа. Барометрические высоты приведены к 0° и даны (вместо парижских линий, как у автора) в миллиметрах. Температура, по Цельсию, приведена для двух крайних и одной средней станции. Высота нижней z_0 станции I над океаном 814 м.

	H	t	$\frac{h}{H}$	По нивелированию метров	По формуле 10 метров
I.	694.39	20.°06	0.01633	0	0
III.	652.07	16. 90	0.01355	540.19	540.02
V.	612.77	12. 32	0.01282	1068.17	1065.70

Бауэрнфейнд расположил данные по часам и нашел разности в метрах для часов дня:

Общая средняя вычисленная высота для данного часа в м

	8 утра	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6 вечера
I — III	—0.7	—1.2	—0.9	+3.1	+2.4	+2.4	+1.4	+2.2	—0.3	—2.6	—4.9
I — V	—5.3	—4.7	—0.2	+1.7	+4.0	+4.9	+4.2	+3.0	+1.2	—3.4	—8.7

Поэтому наибольшие отступления от среднего вывода составляют от —0.9 до +0.5‰, а особенно разительно то обстоятельство, что средний вывод для обеих станций меньше действительности, но для I—III очень близок к ней; для I—V отступление среднего от истины = —2.5, или около ¼‰.[1]

На основании сличений действительно точно измеренных высот[2] с теми, какие определены гипсометрически, выводится обыкновенно следующее заключение. 1) Средние из большого ряда единовременных наблюдений на двух соседних пунктах дают высоту, очень *близкую* к действительной. К этому я прибавлю, и считаю эту прибавку очень существенною, что средняя вычисленная из большого числа наблюдений высота *всегда меньше* действительной. Это видно из вышеприведенных и из многих других чисел и может быть объяснено. 2) В полдень получается высота бо́льшая, чем средняя для всего дня (но, прибавим, немного ее превышающая и мало отличающаяся от действительной), утром и вечером меньшая, чем средняя для всего дня. 3) Зимою

[1] Бауэрнфейнд объясняет отступления и разности неправильностями в показаниях термометров, зависящими от лучеиспускания почвы, но это объяснение не выдерживает критики.

[2] С проведением железных дорог в последнее время множество пунктов точно нивелированы. Вся Швейцария имеет ныне общую и очень точную нивелировку.

высота определяется меньшая, чем летом, напр. для Женевы и С.-Бернара, сравнительно со средним годовым, Плантамур заметил следующие разности:

	Полдень	4 ч.	8 ч.	Полночь	4 ч.	8 ч. утра	Среднее суточное
Июнь	+32.7	+25.5	+ 4.7	−11.3	−11.1	+15.7	+ 9.3 м
Декабрь . . .	− 5.1	−10.1	−19.4	−19.5	−22.4	−19.5	−15.8 м

4) К этим выводам должно прибавить, что летом ранее полудня (около 11 ч.) и летом после полудня (около 3 ч.) получаются высоты, хотя и более средних для целого дня, но близкие к действительности; в остальные часы дня и в остальные времена года высоты отличаются от действительности и обыкновенно, особенно зимою и ночью, меньше действительности.[1] Поэтому для получения истинной высоты должно избирать лето и производить наблюдения с 9 ч. утра до 5 ч. вечера. 5) Замеченные отступления (вычисленных высот против действительных) часто много превышают погрешности, возможные в данных наблюдениях. Легко вывести, что возможная погрешность $\pm\Delta(z)$ в гипсометрическом определении высоты (при поверхности земли) стоит в следующей зависимости от погрешностей: $\pm\Delta(K)$ барометрического постоянного, $\pm\Delta(H)$ барометрического отчета, $\pm\Delta(t)$ температуры и $\pm\Delta(h)$ упругости пара:

$$\Delta(z) = z\,0.00013\,\Delta(K) + 11\,\Delta(H) + z\,0.00368\,\Delta(t) + z\,0.00050\,\Delta(h) \quad \text{(XIV)}$$

Если предположим, что наибольшая $\pm\Delta(K)=1$; $\pm\Delta(H)=0.2$ мм; $\pm\Delta(t)=1°$; $\Delta(h)=0.5$ мм, то:

при $z=$	100	500	1000	5000	10000 м
наибольшая $\Delta(z)=$	2.6	4.4	6.5	23.7	45.3 м.

В среднем из нескольких наблюдений с приборами, сколько-либо точными, и вводя все поправки, погрешности $\Delta(H)$, $\Delta(t)$ и $\Delta(h)$ должно принять раз в пять меньшими против выше данных а как погрешность от $\Delta(K)$ вовсе не влияет на отступления от среднего результата, ибо везде входит с одним знаком, то от неточности отчетов можно ждать разностей от среднего, раз в пять меньших против вышеуказанной разности от абсолютной величины. В действительности же, как указано выше, разности гораздо часто больше, чем вышеприведенные. Следовательно они зависят не от приборов, что́ видно и из их правильности и периодичности изменения. 6) Замеченные отступления много

[1] Очень важно заметить, не около того же ли времени изображения дальних предметов, близких к горизонту, наблюдаемые в трубу, оказываются покойными. Известно, что в бо́льшую часть дня земная рефракция неправильна (отрицательная), и тогда изображения не покойны, но колеблются.

превышают различия в небольших разностях разных гипсометрических формул.

Для того чтобы понять, где же причина замечаемых различий, рассмотрим степень применимости гипотез, лежащих в основании всяких гипсометрических формул.

Гипсометрические формулы основываются на допущении состояния равновесия в атмосфере, но такого в действительности никогда не бывает; воздух находится в постоянном движении, и если мы представим себе только, что от нагревания он поднимается вверх, а от охлаждения падает, а такие перемены совершаются с воздухом постоянно, то станет ясным, что в первом случае будет от того происходить уменьшение давления, а во втором — увеличение его, зависящие не от массы давящего воздуха, а от скорости его движения. Этим объясняются суточные периоды отступления от средних гипсометрических высот, хотя такому объяснению, должно сознаться, ныне еще недостает опытных доказательств. Днем, как мы видели, получаются высоты бо́льшие, чем ночью. По смыслу гипотезы должно думать, что днем на верхней станции наблюдения убыль давления от восходящего тока больше, чем в нижней станции, ибо в верхней восходящему току менее препятствия, чем в нижней станции.

В подтверждение такой гипотезы можно привести одно совпадение периодов дня с периодами изменения гипсометрических высот и некоторое соответствие этих периодов с периодами дневного нагревания и ночного охлаждения. Однако вопрос и поныне нельзя считать разработанным в достаточной мере. А он заслуживает дальнейшей разработки. Аэростатические восхождения и точный, подробный разбор собранных поныне наблюдений могут уяснить дело в бо́льшей мере, чем в настоящее время.

Эти же причины уясняют (?) перевес летних данных над зимними, показывая, что летом преобладают восходящие, зимою нисходящие токи. Но гипотеза об этих токах не уясняет того, что, в среднем выводе, вычисленная высота меньше действительной. Далее выставляется гипотеза, могущая это объяснить. Но прежде чем обратиться к ней, остановимся на некоторых других обстоятельствах. На данном уровне атмосферы давление не остается постоянным, а изменяется с местом и временем; так, около 4 ч. дня и ночи давление обыкновенно бывает наименьшим, а около 10 ч. утра и 10 ч. вечера оно бывает наибольшим. Не периодические, временные изменения в давлении, напр. во время бурь, нередко несравненно сильнее упомянутых периодических и правильных изменений. Это приливы, отливы и волнения воздушного океана. На разных глубинах его они различны. Их существование устранило бы всякую возможность барометрического нивелирования, если бы волны были сильны и неправильны, как это бывает во время бурь, сопровождающихся сильными

ветрами. Но обыкновенно колебания в массе воздуха распространяются единовременно на обширные пространства по горизонтальному направлению и на большие слои вверх. Чем меньше разность расстояний, и *особенно — чем меньше разность высот, тем больше вероятности* иметь в двух местах *единовременные состояния атмосферного движения, тем большее будет сходство как в качестве восходящих и нисходящих токов, так и в силе и направлении ветра, в периодах и амплитудах всяких атмосферных изменений.*[1] Поэтому, если точки A и B лежат не очень далеко одна от другой и если определять в них давление единовременно, то по разности давлений можно судить о разности уровней уже с большею вероятностью, потому что волны атмосферы громадны по длине, но не по амплитуде. Давления в близлежащих местах близки между собою; равновесие нарушается, говоря о целой массе атмосферы, а не о соседних местах, если нет особенно сильных переворотов, напр. бурь, штормов и т. п. По этой-то причине прием барометрического измерения высот должен состоять в сущности в том, что в точках A и B единовременно производятся барометрические наблюдения и записываются по сверенным часам. Сличив затем ход барометрического изменения в месте A с тем, который замечен в месте B, и взяв единовременные наблюдения, получим данные, необходимые для гипсометрической формулы. Если же, как иногда и делается, давление в одной точке, напр. A, наблюдается в некоторое время, а потом переходят в точку B и там наблюдают давление, то может вкрасться значительная погрешность, устранимая при правильном единовременном наблюдении давлений, потому что во время перехода из A в B давление может перемениться. Результат будет тем точнее, чем большее число наблюдений имеется в распоряжении, тогда в среднем выводе исчезнут маленькие неравенства, зависящие от того, что на одном уровне давления в данный момент не одинаковы, а различаются так же, как давления под поверхностью взволнованной жидкости.

С другой стороны, известно, что при одном и том же уровне, напр. при уровне океана, барометрические давления даже в общем среднем годовом результате неодинаковы. Так, напр., на уровне океана:

При широте места . .	0—20°	20—30°	30—40°	40—50°	50—60°	60—70°
Средняя наблюденная годовая высота барометра около	760	764	765	762	759	754
Исправленная высота на изменение тяжести, приводя к 45° . . .	758	763	764	762	760	756

[1] Это подчеркнуто ради того значения, какое имеет для применимости дифференциального барометра к нивелированию.

Отсюда видно, что при широте около 35° среднее давление больше, чем в местах, ближайших к полярному кругу и экватору. Соединяя те точки на поверхности земли, где среднее атмосферное давление при одном уровне одно и то же, получим кривые, называемые *изобарами* или изобарометрическими. Изобары, как изотермы, изменяют свои изгибы по временам года и по периодам времени вообще. Поэтому, если точки *A* и *B* далеки одна от другой, то должно вводить поправку в результаты наблюдений сообразно с изгибом изобарических линий. Однако в практике барометрического нивелирования к этому не приходится прибегать, если точки *A* и *B* лежат не далеко одна от другой, напр. на вершине горы и у ее подошвы. Но в том случае, когда по барометрическим наблюдениям желают определить высоту места над уровнем океана, далеко отстоящего от места наблюдений, необходимо принять во внимание изгибы изобар. Предмет этот, хотя и новый, однако уже для всего света и в частности даже для России (Воейков, Рыкачев) обработан в настоящее время с некоторою полнотой, ибо имеет важное метеорологическое значение, так как ветер (а он определяет погоду) направляется от мест бо́льшего давления к местам меньшего давления, т. е. стремится двигаться по нормалям изобар.

При выводе гипсометрической формулы предполагается, что состав газов воздуха, т. е. содержание в нем кислорода, азота и углекислоты, постоянен; в действительности же несомненно, что он изменяется, хотя эти изменения и незначительны. Так, количество углекислого газа в воздухе на разных высотах, как показывают многочисленные наблюдения, значительно изменяется. Впрочем, вследствие малости абсолютного количества углекислого газа в воздухе, влияние относительных больших изменений имеет малое значение на среднюю плотность воздуха. То же должно сказать о тех небольших изменениях содержания кислорода и азота в различных слоях воздуха на разных высотах, которые можно подозревать теоретически и которые отчасти подтверждены наблюдениями. Теоретически необходимость такого различия вытекает из закона Дальтона, относящегося до смешения газов. Дальтон, а за ним все признают, что каждый отдельный газ, находящийся в смеси, действует всегда, напр. при растворении, так, как будто бы других газов к нему не было подмешано, т. е. под давлением во столько раз меньшим давления всей газовой смеси, во сколько объем данного газа меньше объема всей смеси. Так, напр., в воздухе около $^1/_5$ кислорода, и кислород находится в нем под давлением не всей атмосферы, а только под давлением $^1/_5$ ее. Доля давления, приходящегося на каждый газ, и носит название *парциального давления*. Следовательно, каждый газ атмосферы находится под своим парциальным давлением и следовательно каждый следует своему закону

изменения плотности с высотами. Закон этот зависит от относительной плотности газов. По этой причине, так как кислород плотнее азота, то его плотность убывает быстрее, чем для азота, с поднятием в верхние слои атмосферы. Азот скопляется таким образом в большем относительном количестве в верхних слоях, и следовательно там воздух, вследствие бо́льшего содержания азота, приобретает меньшую нормальную плотность. Неоднократно предполагали даже, что в самых верхних слоях атмосферы находится легчайший газ — водород, хотя его содержание в атмосфере земной поверхности или ничтожно мало, или даже сомнительно. Прибыль в процентном содержании азота в верхних слоях атмосферы находит отчасти подтверждение в тех исследованиях над составом воздуха, которые сделал Буссенго в центральной Америке на разных высотах; а именно, он нашел (Annales de chimie et de physique, сер. 3, т. III), что в Мариквита, на высоте 548 м над уровнем моря, объемный процент кислорода равен 20.77; в Ибакве, на высоте 1323 м, процентный объем кислорода равен 20.70, а в Сантафе-де-Богота, на высоте 2650 м, он равен 20.65%, т. е. с поднятием над уровнем моря содержание кислорода уменьшается, как и надо ждать по закону Дальтона. Должно однако заметить в этом отношении, что число наблюдений над убылью кислорода в верхних слоях атмосферы и поныне еще незначительно, чтобы можно было считать вполне доказанным это обстоятельство. Воздухоплаватели,[1] поднимающиеся в верхние слои атмосферы, уже обратили внимание на этот предмет, но их путешествия еще не дали результатов надлежащей точности и полноты. Можно, разве, цитировать анализы Миллера, сделанные с воздухом, собранным Вельчем в 1853 г. (Philosophica; Transactions, V, 143, p. 339). Высота 0; 13460′; 18315′ (англ. футы)I объем кислорода 20.92; 20.89; 20.82.

Наблюдение, сделанное однажды Гей-Люссаком при его знаменитом аэростатическом восхождении (1804 г.), не показывает этого различия в содержании кислорода. Но оно, по своей отрывочности, не должно влиять на решение вопроса, потому что в его время приемы анализа газов не были достаточно хорошо выработаны. Неравномерность в составе различных слоев атмосферы в природе должна нарушаться теми постоянными восходящими и нисходящими токами воздуха, которые происходят вместе с нагреванием, охлаждением, осаждением влаги, паров и т. п. обстоятельствами. Если представить себе атмосферу совершенно спокойною, то и тогда на доступных высотах изменения в составе воздуха будут, вследствие малого различия плотностей кислорода и азота, весьма незначительны. Для примера разочтем, каково будет процентное содержание кислорода на высоте высо-

[1] Начиная с Захарова (1804, июнь) и Гей-Люссака (1804, сентябрь).

чайших гор Гималая, приняв, что такая высота достигает 9000 м. Для такого расчета воспользуемся основным уравнением (VIII), предположив воздух сухим и считая, что для кислорода $e_0 = 1.43$, для азота 1.26, поэтому, называя парциальные давления кислорода H_0 и H_1, а такие же для азота H'_0 и H'_1, получаем (для 45° широты):

Кислород

$$z = \frac{7993 \cdot 1.293}{1.43}\left(1 + k\frac{t_0 + t_1}{2}\right)\ln\frac{H_0}{H_1}$$

Азот

$$z = \frac{7993 \cdot 1.289}{1.26}\left(1 + k\frac{t_0 - t_1}{2}\right)\ln\frac{H'_0}{H'_1}.$$

В этих формулах z должно положить равным 9000 м. На поверхности земли температуру t_0 примем равною 15°, а на высоте 9000 м t_1 положим, что близко к действительности, $= -15°$. Атмосферное давление на поверхности океана примем в 760 мм. Парциальное давление H_0 кислорода найдется здесь (т. е. у поверхности океана) по этому давлению, если принять, что 100 объемов воздуха содержат 21 объем кислорода, так как

$$H_0 : 760 = 21 : 100,$$

откуда

$$H_0 = 159.6 \text{ мм}.$$

Парциальное давление азота внизу поэтому $H'_0 = 600.4$ мм, парциальные давления вверху H_1 и H'_1 должно отыскать; их отношение будет выражать отношение объемов кислорода и азота на высоте 9000 м. Для нахождения двух этих неизвестных мы имеем два уравнения:

$$2.3026\ \frac{9000 \cdot 1.43}{7993 \cdot 1.293} = \lg 159.6 - \lg H_1,$$

$$2.3026\ \frac{9000 \cdot 1.26}{7993 \cdot 1.293} = \lg 600.4 - \lg H'_1.$$

Отсюда находим, что на высоте 9000 м, если бы воздух был сух и спокоен, парциальные давления кислорода и азота были бы 45.93 и 200.36, а потому все давление атмосферы было бы $= 246.29$ мм, а процентное по объему содержание кислорода было бы 18.65 вместо 21%, как на поверхности земли.

Рассчитывая по целому давлению атмосферы (внизу 760, вверху 246.29) вместо 9000 м высоты, получим высоту $z = 9006.2$, а потому погрешность составляет только $\frac{1}{1500}$ всей величины. Поэтому от упущения вышеизложенного обстоятельства нахо-

дится высота больше действительной, но превышение всегда будет менее $\frac{1}{1500}$ высоты.

Итак, на высочайших горах, на вершины которых не восходил еще человек (на аэростате поднимались выше), если и справедлив закон Дальтона, содержание кислорода только на $1^1/_2\%$ менее, чем на поверхности земли. Следовательно, там плотность воздуха, при нормальном давлении, только немногим менее, чем на поверхности земли. Различия, от того происходящие, при огромных высотах, впадают очевидно в пределы погрешности наблюдения, а потому нельзя возражать против справедливости гипсометрических формул на основании того, что они не заключают в себе поправки, относящейся к изменению состава газов воздуха на разных высотах. Такую поправку легко было бы ввести, и она заключалась бы, при обыкновенных наблюдениях, далеко в пределах погрешности наблюдений.

Другое дело по отношению к водяным парам воздуха. Изменчивость их содержания в разных слоях атмосферы и их меньшая против воздуха плотность ($d=0.623$) делают необходимым рассмотрение изменения их парциального давления с высотами.[1]

Вслед за Дальтоном атмосферный воздух рассматривают часто как смесь двух независимых атмосфер: сухого воздуха и водяного пара. Так, Дове в ряде статей разбирает изменение упругости сухого воздуха в разных условиях на поверхности земли. Давление атмосферное равно сумме парциальных давлений сухого воздуха и водяных паров. Все атмосферное давление мы станем теперь, как и прежде, означать через H_0 и H_1, а через P_0 и P_1 означим упругости сухого воздуха, продолжая через h_0 и h_1 означать упругости водяного пара. Ограничиваясь важнейшими множителями уравнения (VIII), при широте 45°, мы имеем для атмосфер:

сухого воздуха

$$z=7993\left(1+k\frac{t_0+t_1}{2}\right)\ln\frac{P_0}{P_1},$$

водяного пара

$$z=\frac{7993}{0.623}\left(1+k\frac{t_0+t_1}{2}\right)\ln\frac{h_0}{h_1}.$$

---

[1] Излагаемое вслед за сим было сообщено мною в декабрьском заседании Физического Общества в 1875 г.; * оно является в первый раз здесь в печати. Замечу при этом, что только один Бессель, сколько мне известно, обратил внимание на влияние парциального давления водяного пара, но хотя и упоминает о дальтоновом законе, однако не применяет его к сухому воздуху, как следует сделать, а идет обычным путем, считая давление измеряющим вес воздуха, т. е. гидростатическим.

* Сочинения, т. VI, 1939, стр. 221—589. (*Прим. ред.*)

Отсюда получаем:

$$0.623 \ln \frac{P_0}{P_1} = \ln \frac{h_0}{h_1}.$$

Разлагая ln в ряд (E) и ограничиваясь первым приближением, которое здесь тем возможнее допустить, что ln входит в обе части, получаем:

$$0.623 \frac{P_0 - P_1}{P_0 + P_1} = \frac{h_0 - h_1}{h_0 + h_1},$$

откуда:

$$h_1 = h_0 \frac{P_1 + 0.232\ P_0}{P_0 + 0.232\ P_1} \quad \ldots\ldots\ldots \text{(XV)}$$

Весьма близки к этому следующие два выражения:

$$h_1 = h_0 \frac{6400 - z}{6400 + z} = h_0 \frac{H_1}{H_0}\left(1 + 0.232 \frac{H_0^2 - H_1^2}{H_0 H_1}\right).$$

На основании (XV) разочтена следующая таблица, показывающая: каковы были бы упругости водяного пара в разных слоях воздуха, если бы водяной пар был газ (не сгущался в облака), когда бы на поверхности земли упругость его была=10 мм, а упругость сухого воздуха была бы=750, что́ может быть при температурах около 12° и выше.

1) Упругость сухого воздуха, P . .	750	650	550	450	350	250
2) Упругость водяного пара h по (15)	10	9.16	8.25	7.30	6.30	5.02
3) Давление атмосферы, H	760	659.16	558.25	457.30	356.30	255.02
4) Наблюдаемая температура (приблизительно)	15°	+8°	+2°	−5°	−11°	−18°
5) Приблизительная высота	0	1200	2500	4100	6100	8100
6) Отношение $1000 \frac{h}{H}$ по (15) . . .	*13.2*	*13.9*	*14.8*	*16*	*18*	*20*
7) Наблюдаемая упругость пара (приблизительно)	10	4.8	3.1	1.7	0.4	0.2
8) Отношение $1000 \frac{h}{H}$ в природе .	*13.2*	*7.4*	*5.6*	*3.8*	*1.2*	*0.8*

Данные 4) и 7) взяты из высших аэростатических восхождений Глешера (Report of the British Association, 1862—1864).

Таблица эта показывает, что равновесие атмосферы водяного пара требует, чтобы частное $\frac{h}{H}$ с возвышением возрастало, хотя и медленно. Но водяной пар в верхних слоях атмосферы сгущается в облака, и в действительности отношение $\frac{h}{H}$ не только не возрастает, не только не остается постоянным (как отношение

парциальных упругостей кислорода и азота), но быстро убывает. Этот факт, составляющий непременное следствие сгущаемости паров и понижения температуры в верхних слоях атмосферы и подтверждающийся разнообразными наблюдениями (см. выше, стр. 89 и 81), показывает, что в атмосфере водяного пара нет никогда равновесия. Недостаток паров в верхних слоях делает то, что *пар нижних слоев постоянно, механически стремится в верхние слои*, подобно тому как газ стремится в пустоту. Следовательно пар течет в атмосфере снизу вверх и потому оказываемое им давление есть гидродинамическое, а не гидростатическое, как обыкновенно принимают. Поэтому упругость пара, определяемая точкою росы или определением веса воды, содержащейся в куб. метре воздуха, не показывает того гидродинамического давления, которое оказывает пар на барометр, а действующее на барометр давление пара всегда менее того, которое определяется гигрометрами. Если ими определена упругость h, то давление пара равно $h-x$. Величина отступления x тем больше, чем быстрее убывает $\frac{h}{H}$ в слоях воздуха. Из этого вытекают очевидные следствия для применения гипсометрических формул, а именно:

1) Для нахождения высот должно брать в расчет не все показываемое барометром давление воздуха, а только парциальную упругость сухого воздуха, ибо для его атмосферы возможно равновесие, не существующее никогда в атмосфере водяного пара. Давление H, показываемое барометром, в средней величине своей есть сумма гидростатического давления P сухого воздуха и гидродинамического давления $h-x$ водяных паров: $H=P+h-x$.

2) При обычном способе рассуждения, служащем для вывода гипсометрической формулы, берут H вместо P, но вводят поправку на изменение плотности от присутствия паров. Должно взять:

$$\ln\frac{P_0}{P_1}=\ln\frac{H_0-h_0+x_0}{H_1-h_1+x_1}, \quad \ldots\ldots\ldots \text{(G)}$$

а берется:

$$\left(\ln\frac{H_0}{H_1}\right)\left[1+0.377\,\frac{1}{2}\left(\frac{h_0}{H_0}+\frac{h_1}{H_1}\right)^{1}\right] \ldots\ldots \text{(H)}$$

Если в гипсометрической формуле VIII сделать замену выражения (H) выражением (G), то она получит вид:

---

[1] В подлиннике (вообще говоря, имеющем много несомненных опечаток, из которых мы оговариваем в примечаниях только наиболее существенные): $\frac{H_1}{h_1}$. (*Прим. ред.*)

$$z = K_0\varphi(l, z)\left(1 + k\frac{t_0 + t_1}{2}\right)\ln\left(\frac{H_0 - h_0 + x_0}{H_1 - h_1 + x_1}\right).$$

Для упрощения формулы этого выражения и по малости дробей $\frac{h}{H}$ и $\frac{x}{H}$ можно принять:

$$z = K_0\varphi(l, z)\left(1 + k\frac{t_0 + t_1}{2}\right)\ln\left(\frac{H_0 - h_0}{H_1 - h_1}\right) + \\ + 8000\left(\frac{x_0}{H_0} - \frac{x_1}{H_1}\right) \quad \ldots\ldots\ldots \text{(XVI)}$$

Если бы $\frac{h_1}{H_1}$ было более $\frac{h_0}{H_0}$ (XV) или бы, по крайней мере, если бы обе величины были равны, то последний член был бы равен 0, потому что не существовало бы стремления паров к движению вверх, а потому:

3) Гипсометрическая формула должна давать наиболее точную высоту в том случае, когда $\frac{h_1}{H_1}$ приближается к $\frac{h_0}{H_0}$; чем они больше разнятся, тем менее точен будет результат расчета для z.

4) Для поправки должно знать $\frac{h_0}{H_0} - \frac{h_1}{H_1}$ и выразить ее как функцию $\frac{h_0}{H_0}$, $\frac{h_1}{H_1}$ и z.

Для подтверждения этих положений беру следующие десятилетние данные для Невшателя и Шомона (см. стр. 79 и 81), заимствуя их из „Schweizerische meteorologische Beobachtungen", herausg. unter Direktion von Professor Wolf (1873) и соединяя вместе, для обозрительности, два соседних месяца.

		Декабрь и январь	Февраль и март	Апрель и май	Июнь и июль	Август и сентябрь	Октябрь и ноябрь
Барометрическое давление	Невшатель	717.40	716.71	717.60	720.96	721.62	718.74
	Шомон	661.08	661.49	662.54	667.48	667.87	663.39
Температура средняя	Невшатель	−0.29	+2.77	11.19	17.92	16.74	+6.81
	Шомон	−2.16	−0.44	7.55	13.21	12.50	+3.78
Относительная влажность, %	Невшатель[1]	89.6	81.7	70.3	69.8	71.5	85.3
	Шомон	85.0	87.6	82.1	76.2	78.2	88.9
Значение 1000 $\frac{h}{H}$	Невшатель	5.61	6.39	9.69	14.76	14.06	8.79
	Шомон	5.02	5.90	9.62	12.93	12.65	8.05

[1] В подлиннике в первой строке стоит „Шомон", а во второй „Невшатель". Поверка по данным Вольфа показала, что это опечатка. (*Прим. ред.*)

Если справедливы предшествующие рассуждения, то данные для апреля и мая, рассчитанные по (XI), должны дать высоту, ближайшую к действительности, потому что для этих месяцев $\frac{h_1}{H_1}$ немногим только меньше, чем $\frac{h_0}{H_0}$, тогда как для других месяцев первая величина значительно менее второй. Действительно, разность $\frac{h_0}{H_0} - \frac{h_1}{H_1}$ в процентах средней величины для месяцев = 11%, 8%, 0.7%, 6%, 3% и 9%. Прилагаем расчет высот Шомона над Невшателем, заметив, что истинная разность высот = *654* м.

Высоты Шомона над Невшателем по гипсометрическим формулам, по 10-летним данным	Декабрь и январь	Февраль и март	Апрель и май	Июнь и июль	Август и сентябрь	Октябрь и ноябрь	Среднее
a) По формуле Лапласа $z =$ [1]	649.5	643.1	661.2	653.7	654.2	653.5	653
b) По (X), (XI) . . . . . $z =$	652.0	645.2	662.6	654.8	655.5	655.0	656
c) По (XVI) $z - K\left(\frac{x_0}{H_0} - \frac{x_1}{H_1}\right) =$	646.0	641.6	659.7	635.8	640.1	647.2	645
d) Отсюда $\left(\frac{x_0}{H_1} - \frac{x_1}{H_0}\right)$ 1000 =	2.25	2.55	0.54	3.52	2.99	2.10	2.3
e) По (XVII) . . . . . $z =$	*660.0*	*653.4*	*661.4*	*679.7*	*673.9*	*654.7*	*664*

[1] Пользуясь таблицами Матье. Приведены эти цифры, чтобы показать с очевидностью, что не от способа расчета гипсометрической формулы и не от различия постоянных (K, k) зависят те крупные различия в высотах, которые существуют для разных месяцев.

Рассматривая эту таблицу, становится очевидным: 1) что находимая обычными приемами (*a* и *b*) высота места, принять ли во внимание влажность (*b*) или нет (*a*), всегда меньше действительной высоты (664 м). Зависит это, по нашей гипотезе, от того, что влияние на барометр восходящих и нисходящих воздушных токов, дневных и ночных, исчезает в среднем результате наблюдений, а влияние всегда существующего различия $\frac{h_0}{H_0} > \frac{h_1}{H_1}$ не уничтожается в среднем, ибо всегда существует и всегда однообразно действует на барометрическую высоту (XVI). 2) Когда неравенство $\frac{h_0}{H_0} > \frac{h_1}{H_1}$ уменьшается, вычисляемые высоты приближаются к действительным, что особенно резко видно из чисел, относящихся к апрелю и маю. В эти месяцы на вершине Шомона испаряется столь же много воды, как и в Невшателе, и величины $\frac{h}{H}$ сравниваются. Эта близость вычисленной и действительной высот для некоторых месяцев, сопоставленная

с тем, что для всех других месяцев вычисляется высота меньшая, чем в действительности, служит главным доказательством справедливости вышеизложенных теоретических соображений. 3) Не обращая внимания на *малые различия*, какие можно ждать как от несовершенства (некоторых постоянных погрешностей) приборов, так и от неполноты теории (напр. от того, что допускаются известные законы для изменения t, что не обращается внимание на изменение напряжения тяжести от влияния массы горы и т. п.), можно видеть, что величина $\frac{x_0}{H_0} - \frac{x_1}{H_1}$ изменяется пропорционально изменению $\frac{h_0}{H_0} - \frac{h_1}{H_1}$. Коэффициент пропорциональности y этих величин (частное из первой на вторую) для Шомона—Невшателя приблизительно равен 3, т. е.:

$$\frac{x_0}{H_0} - \frac{x_1}{H_1} = 3\left(\frac{h_0}{H_0} - \frac{h_1}{H_1}\right),$$

потому для этого случая:

$$\left.\begin{aligned} z &= K_0\varphi(l,z)\varphi(t)\ln\frac{H_0-h_0}{H_1-h_1} + 24\,000\left(\frac{h_0}{H_0} - \frac{h_1}{H_1}\right) \\ \text{или}\quad z &= K_0\varphi(l,z)\varphi(t)\ln\frac{H_0}{H_1} + 16\,000\left(\frac{h_0}{H_0} - \frac{h_1}{H_1}\right)\text{.}^1 \end{aligned}\right\} \quad \ldots \text{(XVII)}$$

Применяя эту формулу, получаем в среднем годовом выводе действительное число 664, составляющее разность высот Шомона и Невшателя по нивелированию, а для летних месяцев число большее действительной высоты, для зимних меньшее, что и объясняется преобладанием в летние месяцы восходящих, а в прочие нисходящих воздушных токов, на которые указывает разность высот облаков в разные времена года.[2]

Дальнейшему исследованию этого вопроса предстоит найти зависимость между высотою места z и величиною вышеуказанного коэффициента y. Нет сомнения в том, что из совокупности точных гипсометрических данных, собранных на местах, ранее нивелированных, можно получить понятие о величине поправок найденных высот по отношению к влиянию восходящих и нисходящих токов воздуха. Рассматривая этот вопрос, я имел в виду, во-первых, наметить путь, которым, по моему мнению, можно разрешить в точности задачу гипсометрии, а во-вторых, показать, сообразно цели этой статьи, что *для малых разностей*

[1] В подлиннике пропущены скобки. *(Прим. ред.)*

[2] Она зависит: 1) от того, на какой высоте встречается точка росы, и 2) от господства восходящих и нисходящих токов. Оттого существует всюду ежедневная периодичность облачности,—ночью облака падают и рассеиваются, оттого облачность мала.

высот (и расстояний), если бы были средства точно определять малые разности давлений, можно ждать точнейшего определения высот, чем для больших разностей высот, потому что тогда и качество восходящих и нисходящих токов, и отношение $\frac{h}{H}$ мало отличаются; при больших же высотах более или менее значительные их различия составляют причину неточностей применения гипсометрических формул. Описываемый далее прибор, названный высотомером, назначен именно для той цели, чтобы определять малые разности давлений, и, судя по сказанному, применяя его к определению малых высот (нивелированию в тесном смысле), нельзя ждать таких абсолютных величин различия, какие нередко дает барометр, когда употребляется для больших высот.[1]

Прежде чем обратиться к описанию высотомера, считаю однако необходимым остановиться на изложении практических правил обращения с ртутными и анероидными барометрами и способов поправки наблюденных по ним давлений. При ртутном барометре я имею в виду преимущественно систему Фортеня, потому что барометры этого рода хорошо известны, всюду описываются, часто встречаются в практике и обыкновенно приспособлены для путешествий.

Те небольшие изменения, которые произойдут в замечаниях, излагаемых далее, при замене фортеневского барометра другими родами переносных барометров, всякий читатель найдет сам, вникнув в сущность дела.

Приемы для определения истинных давлений

Никакой барометр, по самой сущности дела, не может дать истинного давления, и сделанные со всяким барометром наблюдения должны быть исправлены на основании предварительного изучения барометра и тех данных, которые наблюдаются при каждом определении давления.

Первое, что должно сделать с ртутным барометром, приступая к его изучению, это есть исследование его шкалы. Она должна иметь такое расположение, чтобы при всяком наблюдении она всегда помещалась в одном и том же положении, и лучше всего в вертикальном, потому что иначе, при изменении наклонения шкалы к горизонту, одни и те же ее деления будут отвечать неодинаковым вертикальным высотам ртутного столба, а следовательно и неодинаковым давлениям. Для этой цели при барометрах, или лучше при шкале, должно иметь особый отвес или

---

[1] Однако можно ждать и здесь *относительных* разностей такого же рода, как и при больших высотах.

уровень, позволяющий легко устанавливать шкалу всегда в определенном положении. В барометрах Фортеня это достигается тем, что весь барометр привешивается к треноге и висит под нею свободно, а потому принимает определенное положение, близкое к вертикальному. Такое устройство однако представляет весьма важный недостаток, а именно тот, что барометр стоит не твердо, а для установки нуля шкалы на уровень ртути в нижнем сосуде приходится касаться винта, находящегося под барометром, и выводить его чрез то из вертикального положения. Поэтому установка на нуль шкалы вообще затруднительна и мало прочна. Лучше, если барометр можно установить в определенное положение неподвижно, чтобы можно было перемещать некоторые части барометра, не изменяя общего направления шкалы. Барометрическая шкала обыкновенно не имеет всех делений от нуля до высших давлений, наблюдаемых в атмосфере, а снабжена делениями только на верхней своей части, которою измеряется положение верхнего уровня ртути в барометре, нижний же уровень устанавливается на некоторую точку, считаемую за нуль шкалы и определяемую или острием, чаще всего костяным, или каким-либо другим соответственным способом. Такое устройство барометрической шкалы заставляет разделять предварительное изучение ее на две части: во-первых, на определение расстояния нуля шкалы до начала делений, а во-вторых, на изучение самых делений, т. е. определение их абсолютной длины. То и другое из этих изучений необходимо производить при помощи некоторой нормальной меры, напр. миллиметрической, предварительно сравненной с достоверными нормальными мерами. Сравнение барометрической шкалы с изученною мерой должно производить не в горизонтальном положении, а в том самом вертикальном положении (по уровню или отвесу барометра определенному), в каком будет помещаться шкала при самых барометрических наблюдениях. Это замечание особенно важно иметь в виду при изучении таких барометров, как Фортеня, потому что в них нуль шкалы представляет конец острия, находящегося в барометрической чашке и закрытого стеклянною оболочкой. Эта последняя может представлять неравномерность в толщине стенок, а самое острие закрепляется не абсолютно твердо на шкале, а привинчивается, а потому изучение шкалы должно производиться не иначе, как после полной сборки барометра. Для этого барометр должен быть помещен в обычном своем положении перед катетометром и рядом с ним должно поставить нормальную меру, с которою и должно сравнить (компарировать) расстояние нуля шкалы от начала делений и самые деления. Если такое сравнение произведено при некоторой температуре, то, зная коэффициент расширения шкалы, легко узнать длину ее частей при 0°. При этом заметим, что барометрические шкалы чаще всего бы-

вают из латуни и что ее коэффициент линейного расширения можно принять за 0.000019. Если шкала стеклянная, как то бывает у многих постоянных барометров, то коэффициент расширения можно принять за 0.000008. Компарацию длины шкалы с нормальною мерой должно произвести с точностью большею чем та, которую представляет непосредственный отчет на барометре. Так, если при барометрическом отчете ясно различаются 20-ые доли миллиметра, то сличение делений шкалы должно произвести с точностью по крайней мере до сотой доли миллиметра, ибо иначе может войти в показание барометрического давления погрешность, зависящая от неточности компарации, превышающая погрешность, зависящую от отчета. Умножая число сравнений, можно увеличить их среднюю точность. Необходимо далее заметить по отношению к барометрам, применяемым для гипсометрических определений, что для них особенно важно изучение тех частей шкалы, которые снабжены делениями, и менее важно точное определение расстояния нуля шкалы от начала делений, *если один и тот же барометр определяет* и H_0, и H_1. Это по той причине, что главный член гипсометрической формулы определяется разностью барометрических высот, и если в ней мы сделаем погрешность на 0.1 мм, мы ошибемся в высоте по крайней мере на 1 м. Если же в расстоянии нуля шкалы от начала делений, т. е. в абсолютной высоте ртутного столба мы ошибемся на 0.1 мм, то это повлечет за собою погрешность в высоте не более, как на $\frac{1}{7500}$ долю всей определяемой высоты, потому что абсолютные величины барометрических давлений входят в знаменателе второй части гипсометрической формулы, имеющей простейший вид [как (XII), формула Бабине].

Это обстоятельство весьма выгодно по отношению к изучению барометров, назначаемых для гипсометрических определений, в особенности в том случае, когда барометром определяются небольшие высоты, ибо тогда достаточно самыми грубыми способами определить расстояние нуля шкалы от начала делений ее и только самые деления должно компарировать со всею надлежащею точностью. Должно заметить в этом отношении, что большинство барометров Фортеня, находящихся в обращении, представляют довольно хорошие деления, близкие к нормам, но расстояние нуля шкалы от начала делений редко близко к действительности; мне попадались такие экземпляры хороших барометров Фортеня, в которых нуль шкалы отстоял от деления, при котором стоит 350 мм, на 365 мм; самые же деления на этом барометре были сделаны с точностью такою, которая вполне удовлетворяла погрешностям барометрического отчета.

Мы далее назовем через g истинное расстояние нуля шкалы барометра от первого деления, на шкале находящегося. Пусть

численная величина, написанная при этом делении, есть n. Назовем далее через k истинную величину одного деления шкалы, предполагая, что все деления равновелики. Изучение барометрической шкалы должно дать величины g и k при 0° из сравнений, сделанных при некоторой другой температуре. Если затем по этой изученной шкале сделан будет отчет b при температуре t, то истинная высота ртутного столба по шкале будет:

$$b_1 = (1 + ct)[g + (b - n)k],$$

где через c означен коэффициент линейного расширения на каждый градус термометра той шкалы, которая имеется в барометре. Далее мы предполагаем уже, что наблюденный барометрический отчет исправлен по отношению к длине шкалы и ее температуре, т. е. что введено число b_1 вместо наблюденного b.

Второе обстоятельство, на которое постоянно должно обращать внимание при барометрическом наблюдении, есть температура ртути в барометре. При всяком определении давления необходимо сделать отчет на термометре, при барометре находящемся, и так вести наблюдения, чтобы температура термометра согласовалась с температурою ртути в барометре. А потому, прежде чем произвести наблюдения барометрической высоты, необходимо дать барометру время принять температуру окружающего воздуха. Для этой цели, если барометрические наблюдения производятся на открытом воздухе, необходимо установить барометр в надлежащем положении, прикрыть его от непосредственного доступа к нему солнечных лучей, ветра и т. п. условий, устраняющих постоянство температуры, и оставить в этом положении на некоторое время, наблюдая притом положение термометра и барометра. Если высоты ртути в барометре и термометре, сперва быстро изменяющиеся, по прошествии некоторого времени станут постоянными, то можно уже считать, что равновесие температуры наступило, и только в этом последнем случае делать отчет. Выше было уже упомянуто о том, что термометр, при барометре находящийся, должен иметь резервуар из такого же стекла, как и самый барометр, чтобы между температурными изменениями барометра и термометра было надлежащее согласие.[1] Кроме того, термометр должен быть исправлен по отношению к своим показаниям. Это обстоятельство имеет большое значение в практике по той причине, что термометра верного нет, и даже, можно сказать, быть не может, потому что раз сделанный термометр со временем изменяет свое состояние, а потому время от времени его показания должно проверять. Для этой цели

[1] Проще всего это достигается, если мастер не подумал об этом, окружая шарик термометра стеклянною трубкой (диаметром равною трубке барометра), в которую налита ртуть.

обыкновенно затруднительно непосредственно выверять самый термометр по отношению к положению его нуля и его температуры 100°, потому что термометр обыкновенно неподвижно закреплен в самом штативе барометра и идет только до 40° Ц. По этой причине поправку должно находить, поместив рядом с изучаемым термометром некоторый нормальный термометр, которого все поправки самостоятельно и надлежащим образом изучены. Такое сличение должно сделать хотя раз при нескольких температурах. Обыкновенно поправка одинакова при разных температурах с точностью до 0.°1 Ц. если термометр изготовлен хорошим мастером. Но во всяком случае поправку эту необходимо наблюсти, сличая с нормальным термометром, по той причине, что температурная погрешность имеет весьма большое влияние на барометрическую высоту. В самом деле, при 760 мм давления термометрическая поправка на каждый градус Цельсия составляет 0.136 мм; следовательно, если в показаниях термометра будет погрешность даже в $^1/_2°$, в барометрической высоте может быть погрешность в 0.07 мм, т. е. такая, которая превышает погрешность непосредственного отчета. При изучении термометра должно составить таблицу поправок его в таком виде, что соответственно каждому градусу его, наблюдаемому на термометре, должно знать такую величину d, которую должно прибавить или отнять от отчета термометра, чтобы получить истинную температуру. Если наблюдаемые высоты невелики, и если при этом разности температур t_0 и t_1 незначительны, то влияние погрешности в термометре будет невелико. Если же наблюдаемые высоты значительны, каковы, напр., высоты гор, и если вообще t_0 значительно разнится от t_1, то влияние термометрической погрешности может быть довольно значительным. Во всяком случае, в пределах обычных погрешностей наблюдения, десятые доли градусов в термометре должны быть надлежащим образом исправлены, чтобы получить величину истинного давления с точностью в сотых миллиметра. Следовательно, температуру t, замеченную на барометрическом термометре, должно исправить при помощи предварительно найденной поправки d, и тогда по наблюденной высоте b_1 найдем ту высоту, которую имел бы барометрический столб, если бы ртуть имела температуру 0°. Для этого служит следующая формула, в которой, равно как и во всем предшествующем изложении, температуры принимаются по стоградусному термометру Цельсия:

$$b_2 = \frac{b_1}{1+0.000181^{\,1}\,(t+d)}.$$

Соединяя эту поправку с предшествующею и принимая во внимание малость коэффициентов расширения ртути и шкалы, считая

[1] В подлиннике „0.000181". (*Прим. ред.*)

притом шкалу латунною, получим барометрическую высоту при 0° b_2, по наблюденной высоте b, следующим образом:

$$b_2 = \frac{g + (b - n)\,k}{1 + 0.000161\,(t + d)}.$$

По этой формуле, зная вперед g, n, k и d, можно составить для каждого изученного барометра соответственную таблицу поправок. Если принять $g = n$, $k = 1$, $d = 0$, то прямо, по наблюденной величине b, можно знать b_2, разделяя b на $1 + 0.00016\,t$, но тогда можно иметь погрешность неизвестного рода и величины.

Третье обстоятельство, на которое нельзя не обратить внимания при изучении барометра, есть чистота той ртути, которая в нем находится. Обстоятельство это имеет немаловажное значение в том случае, когда требуется по наблюденной высоте знать истинное давление, выражаемое столбом ртути при 0°, предполагая ртуть совершенно чистою, т. е. имеющею плотность при 0° равную 13.5959, как то принято в гипсометрической формуле. Конечно, если наблюдаемые высоты невелики, и следовательно разности давлений также незначительны, то определение чистоты ртути имеет маловажное значение, если в обоих барометрах, служащих для наблюдений в точках A и B, взята одна и та же ртуть. Но при измерении значительных высот, — так как плотность ртути входит в постоянный член гипсометрической формулы, когда разность давлений довольно значительна, — необходимо точное убеждение в чистоте ртути барометра. Для этой цели может служить особенное определение плотности ртути, влитой в барометр, нарочно предварительно произведенное. Должно заметить при этом, что легко ввести поправку на плотность ртути в барометре, принимая во внимание, что всякие нечистоты ртути уменьшают ее плотность, следовательно, так сказать, действуют подобно нагреванию ртути. Следовательно, поправку на плотность ртути можно считать поправкою на температуру ртути и, следовательно, ввести эту поправку в ту величину $+d$, которая входит в предшествующее выражение. О чистоте ртути в барометре можно судить по некоторым внешним признакам, ибо ртуть сколько-либо нечистая пачкает стенки стеклянных трубок, в которых она находится. Если барометрический сосуд, как то бывает нередко, сделан из чугуна или железа, то ртуть часто грязнится весьма легко, однако при этом почти не меняет своей плотности. Чистота поверхности ртути, и в особенности чистота стенок барометрического сосуда (там, где нуль шкалы барометра), служит обыкновенно достаточным доказательством чистоты ртути.

Поправки показаний барометра, о которых выше была речь, обыкновенно производятся всеми наблюдателями, те же две по-

правки, о которых сказано будет далее, нередко упускаются из вида, хотя часто имеют еще бо́льшее значение, чем поправка в особенности первого рода.[1] Я хочу сказать о поправке на упругость воздуха в барометрической пустоте и о капиллярной поправке.

Барометр, собственно говоря, измеряет разность упругостей атмосферного воздуха и тех газов, которые находятся в его так называемой торичеллиевой пустоте. Чтобы узнать по наблюденному показанию барометра истинное давление, к высоте b_2 должно прибавить еще поправку на упругость воздуха, заключенного в торичеллиевой пустоте. Мне неизвестно[2] ни одного барометра, тщательно изученного, в котором не было бы этой поправки, и хотя бы при приготовлении барометра на первое время поправка и была ничтожно мала, она со временем может достигать некоторой величины и тогда остается постоянною. Ее следовательно необходимо предварительно отыскать, дабы по наблюдениям иметь истинное давление. Эта поправка особенно важна при гипсометрических определениях, потому что в них барометрическая высота меняется, а следовательно, меняется и емкость торичеллиевой пустоты, а потому заключенное в ней количество газа производит тогда неодинаковое давление. В самом деле, пусть при барометрической высоте b_0 объем торичеллиевой пустоты будет V_0, а упругость газов, в пустоте находящихся, C_0. Если затем будет наблюдаемо меньшее давление b_1, то объем пустоты очевидно будет, при обычном устройстве барометров, больше предыдущего, а именно $V_1 > V_0$; тогда упругость газов, находящихся в торичеллиевой пустоте C_1, найдется на основании мариоттова закона, по которому произведение из упругости на объем есть величина постоянная. А потому

$$V_0 C_0 = V_1 C_1,$$

следовательно:

$$C_1 = \frac{V_0 C_0}{V_1}.$$

И так, мы найдем необходимую поправку, если будем заранее знать, какой объем v_1 отвечает каждому наблюдению, и если,

---

[1] Последние 5 слов печатаются так, как они напечатаны в подлиннике, хотя смысл их настолько мало понятен, что заставляет предположить здесь какую-то опечатку. (*Прим. ред.*)

[2] См. мое сочинение: „Об упругости газов", т. I, гл. 4.* В последнее время в моей лаборатории, однако, находится один барометр, приготовленный В. А. Гемилианом по способам, описанным в цитированном выше сочинении. В этом барометре нет газов; вот уже в течение 2—3 месяцев для него получается поправка, равная нулю.

* Сочинения, т. VI, 1939, стр. 359—401. (*Прим. ред.*)

сверх того, предварительно узнаем, что при некотором объеме v_0 упругость газов в пустоте находящихся $= c_0$. При этом объем может быть выражен в каких-либо условных величинах. Проще всего выразить его в делениях трубки. Обозначим через N всю длину барометрической трубки, начиная от нуля и считая вверх по шкале до окончания барометрической трубки. Эту величину N можно найти непосредственно, если смерить расстояние от верхнего конца барометрических делений до верхнего конца барометрической трубки.[1] Так, например, если на барометрической шкале имеется наверху цифра 820 мм и если наружный верхний конец барометрической трубки отстоит от этого деления на 42 мм, притом если толщину стекла трубки можно принять за 2 мм, то величина N найдется, приложив к 820 число 42—2, т. е. N будет $= 860$. Если это N известно, то, наблюдая в данном определении положение верхней части ртутного мениска b_i по шкале, мы найдем величину, пропорциональную емкости пустоты, если из N вычтем барометрический отчет b. Следовательно,

$$v_i = N - b_i .$$

Для того чтобы найти при некотором v_0 упругость газов в пустоте c_0, необходимо иметь возможность при данном постоянном давлении изменить емкость пустоты. Это достигается весьма легко в таких барометрах, где можно в открытую ветвь барометра или в его чашку прилить произвольное количество ртути. Через такое прилитие уровень ртути поднимется как в чашке, так и в барометрической пустоте и емкость последней изменится. При таком приеме необходимо только наблюсти, чтобы приливаемая ртуть имела температуру такую же, как и температура ртути в барометре, и чтобы вместе с прилитою ртутью в барометр не попали новые пузырьки воздуха. В течение короткого промежутка времени, потребного на прилитие, можно считать, что атмосферное давление не переменится в пределах погрешности наблюдения, и потому могут быть произведены два наблюдения при разных емкостях пустоты. Получится два отчета: b_0 при емкости пустоты v_0 и барометрическая высота b_1 при емкости пустоты v_1. Упругость воздуха в барометрической пустоте c_1 равняется упругости атмосферного воздуха, которая нам в этом опыте неизвестна и которую назовем через x, без

[1] Нет нужды предполагать окончание трубки плоским, потому что и окончание столба ртути не представляет плоскости, а при обыкновенных размерах переносных барометров имеет выпуклость, соответствующую той вогнутости, которую представляет верхняя часть барометрической трубки. По этой причине емкость пустоты можно считать пропорциональною расстоянию верхней части ртутного мениска от верхней части барометрической трубки, за вычетом толщины ее стекла. О толщине стенок наполненного барометра можно точно судить по способу Браве, далее (стр. 117) описанному.

упругости, выраженной высотою ртутного столба. Следовательно, считая x постоянным, хотя неизвестным, имеем следующие равенства:

$$c_0 = x - b_0,$$
$$c_1 = x - b_1.$$

Сверх того, на основании мариоттова закона, имеем следующее равенство:

$$c_0 (N - b_0) = c_1 (N - b_1).$$

В этих трех уравнениях три неизвестных: x, c_0 и c_1, а потому определим их и следовательно узнаем упругость c_0 при емкости $v_0 = N - b_0$. Дальнейшие подробности наблюдения см. „Об упругости газов", т. I, гл. 4.

А так как произведение из упругости c_0 на объем v_0 есть, по мариоттову закону, величина постоянная, следовательно, если мы узнаем произведение $c_0 v_0$ и разделим его на объем, свойственный пустоте при наблюденном давлении b, то получим поправку, которую должно ввести на упругость воздуха, оставшегося в барометре при этом наблюдении. Эта поправка всегда будет величиною положительною. Назовем барометрическое давление, поправленное в этом отношении, через b_s, то очевидно, что

$$b_s = b_2 + \frac{c}{N - b},$$

где c есть постоянное ($= c_0 v_0 = c_0 (N - b_0)$), для каждого прибора различное, а $N - b$ тот объем, который в данном случае составляет торичеллиевую пустоту.

Если для гипсометрических измерений употребляется барометр Фортеня, то с ним нельзя произвести всех необходимых действий в том виде, как описано выше, потому что в нем только весьма незначительно можно изменять емкость пустоты, действуя винтом, находящимся под воронкой, ибо количество ртути в приборе постоянно. Притом тогда нельзя пользоваться шкалою барометра, потому что тогда нуль шкалы не будет уже соответствовать нижнему положению ртути. В этом случае можно прибегнуть к другому способу изменения емкости пустоты, а именно, к уменьшению давления и к определению разности давлений особым манометром. Для этого должно поместить барометр в особый цилиндрический и герметический сосуд, сообщающийся, с одной стороны, с воздушным насосом, а с другой—с открытым ртутным манометром, т. е. с широким обратным сифоном, содержащим в нижней своей части ртуть. Первое наблюдение должно произвести при атмосферном давлении, тогда в манометре уровни ртути будут на одной высоте. Пусть наблюденное тогда барометрическое давление будет равно b_0, а емкость пустоты v_0. Теперь понизим уровень ртути

в сосуде фортеневского барометра до некоторой величины, поместим барометр в указанный выше герметический сосуд и станем выкачивать воздух до тех пор, пока нуль барометрической шкалы не будет отвечать нижнему уровню ртути в барометре. Когда этого достигнем, то прекратим выкачивание воздуха и наблюдем, с одной стороны, давление, показываемое барометром, а с другой — показываемое манометром, пусть первое будет равно b_1, а второе d_1, атмосферное давление, обозначенное выше через x, очевидно, будет равно сумме барометрического и манометрического давлений. Следовательно составятся следующие 3 уравнения, соответственные трем предшествующим уравнениям:

$$c_0 = x - b_0,$$
$$c_1 = x - d_1 - b_1,$$
$$c_0(N - b_0) = c_1(N - b_1).$$

Отсюда найдем искомую величину $c = c_0(N - b_0)$, необходимую для поправки, ибо имеем 3 уравнения с тремя неизвестными x, c_0 и c_1.

Эта величина c характеризует барометр: чем она меньше, тем барометр лучше, т. е. тем меньше воздуха осталось в его пустоте. Барометр можно считать негодным к употреблению, если поправка c при разных температурах получится значительно неодинаковою, потому что это покажет содержание жидкой воды в барометрической пустоте, ибо упругость ее паров, зависящая от объема пустоты, значительно изменяется от температуры. Если в барометрической пустоте находится не жидкость, а газ или пар, не насыщающий пространства, следующий законам газов, тогда, введя описываемую поправку, можно пользоваться барометром с уверенностью в пределах прочих погрешностей наблюдения.

Нельзя при этом не обратить внимания на весьма большую пользу от такого видоизменения в устройстве барометров, при котором емкость пустоты всегда может быть сделана одною и тою же, ибо тогда поправка в отношении упругости будет величиною постоянною. При этом на гипсометрические результаты она и не будет иметь заметного влияния, так что ее тогда можно и не находить. Для того же, чтобы иметь возможность все наблюдения производить при постоянной емкости пустоты, необходимо шкалу перевернуть, нуль ее иметь наверху и уровень ртути доводить до того, чтобы верхний мениск ее приходился на нуле шкалы, также находящемся наверху, а отчет производить по нижней части шкалы, как ныне он производится по верхней части. Дабы иметь возможность такого устройства барометров, необходимо значительно изменить обычную конструкцию их и прибегнуть к сифонным барометрам. По нескольким попыткам, сделанным мною в этом отношении, я могу думать, что есть

возможность соединить две ветви сифонного барометра внизу каучуковою трубкой; барометр чрез это становится весьма легким и получается легкая возможность доводить верхний уровень ртути до определенного положения, отвечающего нулю шкалы. Для этого стоит только открытую ветвь барометра поднимать или опускать, что́ и допускается гибкостью каучуковой трубки. Такой барометр имеет, сверх того, еще и то удобство, что при перенесении, после надлежащего наклонения, барометра, заставляющего ртуть подняться до его верха, можно запирать каучуковую трубку снаружи зажимом, и тогда барометр приобретает свойство легкости в переноске, что́ не маловажно в практическом отношении. Эту сторону дела не должно забывать при гипсометрических измерениях. Барометр Фортеня становится переносным, если его наклонить до того, чтобы ртуть выполнила всю трубку, и затем нижний винт поднять до того, чтобы он запер отверстие в барометрической трубке и чтобы ртуть выполнила камеру. Тогда барометр перевертывается, вкладывается в соответственный футляр и переносится в обратном положении, т. е. чашкою кверху. Это последнее делается для того, чтобы вследствие случайных толчков, неизбежных во время переноски, не могли ворваться в барометрическую трубку пузырьки воздуха и ртуть не получала бы толчков, могущих содействовать образованию пустоты, причем барометр легко бьется.

Нам остается затем обратиться к последней, можно сказать, важнейшей и в то же время наиболее сомнительной барометрической поправке, а именно к поправке на капиллярность.[1] Известно, что, взяв два сообщающиеся между собою сосуда с ртутью, один значительного диаметра, напр. более 30 мм, а другой меньшего диаметра, мы заметим, что высота верхних частей ртути, или выпуклых поверхностей ртути, или вершин менисков, в обоих сосудах не будет одинакова, а именно в узком сосуде она будет ниже, чем в широком. Такая разность уровней называется *депрессией*. Она зависит от того давления, которое оказывает выпуклая поверхность ртути или ртутный мениск. Это видно из того, что при разной степени выпуклости, т. е. при разных высотах менисков, измеренных по вертикальной линии, считая от того места, где выпуклость начинается, т. е. от стенок сосуда, до вершины мениска, депрессия не одинакова, хотя бы диаметры и оставались те же самые. Это последнее

---

[1] Я ничего не говорю здесь о способах отчета барометров, ибо этот, однако, весьма существенный вопрос рассматривается в курсах физики и разрешение его зависит более от индивидуальных качеств наблюдателя и прибора, чем от знакомства с основными началами точных барометрических поправок. Дело в том, что отчет должно производить по вершине мениска (выпуклости ртути), а не по какой-либо другой части мениска, и должно избежать параллактической погрешности, относя положение вершины к делениям шкалы.

обстоятельство и составляет причину затруднения в барометрической поправке на депрессию ртути. Если бы депрессия при данном диаметре трубки была постоянною величиной, как то нередко предполагают, легко было бы ввести поправку на депрессию, если бы знать диаметр барометрической трубки и барометрического сосуда. Если бы депрессия, соответствующая диаметру барометрической трубки, была равна $д$, а депрессия, отвечающая сосуду барометра, была $д_1$, то из наблюдения барометрической высоты b_3 можно было бы судить об истинной барометрической высоте b_4 по следующему соображению (причем предполагается, что нуль шкалы находится на верхней части нижнего мениска): в широком сосуде, сообщающемся с барометрическою трубкой, высота ртути была бы выше, чем в барометре, следовательно к наблюденной барометрической высоте b_3 должно прибавить депрессию $д$, чтобы получить поправку по отношению к трубке. В широком же сосуде, сообщающемся с открытою ветвью барометра или с его чашечкою, ртуть стояла бы выше, чем нуль, именно на высоте $д_1$. Следовательно барометрическая высота $b_4 = b_3 + д - д_1$. К этому виду и приводится всегда барометрическая поправка на капиллярность. Дело же в том, что величины $д$ и $д_1$ не определяются одними диаметрами трубки и чашки; при данном диаметре депрессия различается, смотря по высоте мениска. Что касается до депрессии в [1] чашечке $д_1$, то если чашка имеет значительный диаметр, как это нередко бывает в фортеневских барометрах, величину депрессии можно принять равною нулю. Барометрические трубки переносных барометров обыкновенно имеют диаметр более 5 мм, но редко более 10 мм, и тогда депрессия довольно значительна, как видно из прилагаемой таблицы. В этой таблице даны депрессии,

Высота мениска в миллиметрах

Диаметр трубки в мм	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
	Депрессия в миллиметрах						
4	0.598	1.158	1.648	2.046	2.348	—	—
5	0.368	0.721	1.042	1.321	1.552	1.731	—
6	0.243	0.478	0.698	0.896	1.068	1.210	1.322
7	0.158	0.332	0.488	0.631	0.758	0.868	0.959
8	0.120	0.238	0.350	0.455	0.551	0.635	0.707
9	0.088	0.174	0.257	0.335	0.407	0.472	0.528
10	0.065	0.130	0.192	0.250	0.305	0.354	0.398
11	0.049	0.097	0.145	0.189	0.231	0.269	0.302
12	0.037	0.074	0.110	0.144	0.176	0.205	0.231

[1] В подлиннике „к". (*Прим. ред.*)

отвечающие диаметру трубки и высоте мениска, измеренным в миллиметрах, и самые депрессии даны также в миллиметрах. Таблица эта извлечена из большой таблицы, данной Полем и Шабусом в „Sitzungsberichte der Math. N. Classe d. Academie d. Wissensch. zu Wien" 1852, т. IX, стр. 834.

Из нее видно, что при диаметре трубки в 6 мм, а этот диаметр наиболее часто встречается в фортеневских барометрах, находящихся в продаже, депрессия меняется от 0.2 до 1.3 мм соответственно изменению высоты мениска от 0.2 до 1.4 мм. Следовательно, если не принимать в расчет высоты мениска, то можно сделать ошибку, доходящую до 1 мм, и следовательно ошибиться в высоте на 11 м. Высота же мениска в барометре изменяется от множества причин. На одном постоянном месте в данном барометре высота эта меняется, смотря по тому, прибывает ли, или убывает вся барометрическая высота. Если она убывает, т. е. барометр падает, высота мениска становится меньше, потому что части ртути, прилегающие к стенкам, встречают в них сопротивление для своего падения, тогда как центральные части ртутного столба этого сопротивления не встречают, а потому падают раньше, чем периферические части. При поднятии барометра, по той же причине, получается более выпуклый мениск. В переносном барометре, употребляемом для гипсометрических измерений, нельзя ручаться за положение ртутного мениска еще в большей мере, чем для барометра постоянного, потому что перемены температуры ртути и разные сотрясения значительно могут видоизменять высоту мениска. Для того, чтобы достигнуть возможно однообразной высоты мениска, приняли за правило перед произведением наблюдения дать барометрической трубке около того места, где находится верхний мениск, легкий толчок пальцем; чрез это ртуть приходит в движение и колебания, отчего мениск получается довольно однородный. Лучше всего достигается однородность мениска, если барометр устроен так, что в нем можно всегда прибавлять ртути или, еще того лучше, убавлять ее. В некоторой мере это достигается и в фортеневских барометрах тем, что перед наблюдением высоты производится установка нижнего мениска ртути на нуле шкалы, а при этом приходится всегда поднимать уровень ртути. Но тут получается в сущности наибольшая невыгода, ибо при поднятии ртути мениск получается наиболее выпуклым и депрессия достигает наибольшей величины.[1]

Из сказанного очевидно, что для получения капиллярной поправки барометра необходимо знать диаметры его трубки и наблюсти при каждом определении высоты менисков. Внутренний

[1] Дальнейшие подробности см. в моем сочинении „Об упругости газов", гл. 4 *о барометрах* (Сочинения, т. VI, 1939, стр. 359—401. *Прим. ред.*) и здесь далее на стр. 119.

диаметр барометрической трубки может быть легко с точностью узнан не только перед изготовлением барометра, но очень приблизительное суждение о величине внутреннего диаметра можно сделать и с барометром уже готовым, хотя при этом легко ошибиться по крайней мере на $^1/_5$ мм (стр. 114). Так как депрессия весьма быстро уменьшается при увеличении диаметра трубки, то для точности наблюдений чрезвычайно важно избирать барометры с широкими трубками; тогда и небольшая погрешность в определенном диаметре имеет малое влияние на величину депрессии. Что же касается до определения высоты мениска, то его должно делать при каждом наблюдении. Для этого нуль нониуса шкалы сперва должно наводить на вершину мениска, а потом на его основание, т. е. на то место, где мениск встречает стенки трубки. Барометрическая высота определяется положением верхней части мениска, а наблюдение нижней его части нужно только для определения высоты мениска. Чем меньше эта последняя при прочих равных обстоятельствах, тем меньше депрессия, а потому тем меньше риску иметь погрешность от депрессии. По этой причине и должно стремиться иметь по возможности малые высоты менисков, следовательно производить наблюдения при уменьшении количества или при понижении уровня ртути. Для этой-то последней цели в барометрах, устраиваемых мною, с давних пор введены особые приспособления для возможности уменьшения количества ртути в барометре. Через такое уменьшение получается возможность иметь мениски наиболее плоские, а следовательно и наименьшие депрессии. Но такое устройство не пригодно в переносных барометрах, потому что делает их более сложными. Если для наблюдений имеется сифонный барометр, то и тогда нельзя пренебрегать депрессионною поправкой. Она должна быть находима через наблюдение высот менисков в обеих ветвях сифона. При этом обыкновенно замечается, что в барометрической ветви высота мениска меньше, а следовательно и депрессия меньше, чем в открытой ветви барометра. Поэтому нельзя пренебрегать депрессионною поправкой в сифонных барометрах. Если бы высоты менисков и диаметры обеих ветвей сифонного барометра были одинаковы, тогда не было бы нужды в капиллярной поправке, и следовательно можно было бы производить более точные наблюдения. Но, судя по сказанному, этого не достигают при обыкновенном устройстве сифонных барометров.

Итак, наблюденная по шкале высота ртути в барометре b должна быть исправлена последовательно: 1) сперва по отношению к шкале, потом 2) по отношению к температуре, затем 3) по упругости воздуха в пустоте и, наконец, 4) по отношению к капиллярной депрессии. Истинная высота барометра H_i, входящая в гипсометрические формулы, должна быть исправлена

во всех этих отношениях. Многосложность указанных поправок служит причиною того, что разные барометры при сличении дают весьма не одинаковые показания. Это особенно касается до переносных барометров, снабженных узкими трубками, ибо в них депрессионная поправка весьма мало точна. А как барометры с широкими трубками признаются практически неудобными для переноски по их ломкости и значительному грузу, то уже по одной этой причине в гипсометрических определениях, производимых ртутными барометрами, нельзя ждать надлежащего согласия с истиной.[1] Если же принять во внимание вышеизложенные причины для некоторой сомнительности всяких гипсометрических формул, то в этих обстоятельствах можно видеть вполне удовлетворительное объяснение для всегдашних некоторых разноречий между гипсометрическими и топографическими определениями высот. Большинство гипсометрических наблюдений, произведенных до сих пор, страдает в особенности тем, что влияние влажности не принято во внимание; она не определялась, а в барометрах не производилось надлежащих поправок на упругость оставшегося воздуха и на капиллярную депрессию.

Здесь уместно упомянуть о том, что при гипсометрических определениях нужно с возможною тщательностью определять температуры воздуха t_0 и t_1, входящие в гипсометрическую формулу. Определение температуры воздуха, как оно ни кажется простым, в сущности требует большой тщательности и соблюдения следующих главных условий: 1) Термометр должен быть выверен, т. е. положение нуля градусов в нем должно быть определено и значение каждого градусного деления поправлено по емкости термометрической трубки и по отношению между ртутным термометром и воздушным. Работы эти редко производятся, а без них в термометрические показания легко вкрадываются погрешности, достигающие до 5—7 десятых долей градуса Ц., хотя бы сделана была поправка по отношению к положению нуля градусов. Достаточно для этого указать хотя бы на то обстоятельство, что ртутный термометр при 20° Ц. представляет различие от воздушного термометра, достигающее до 0.°2. 2) Для определения температуры воздуха необходимо, чтобы термометр был защищен от непосредственного действия солнечных лучей, т. е. находился бы в пространстве, вполне отененном, открытом на север и защищенном от юга. Это правило, строго соблюдаемое при метеорологических наблюдениях, нередко упускается из вида при гипсометрических определениях, а без точного его соблюдения легко в температуре воздуха сделать погрешность, превышающую 1° Ц., как это особенно

[1] В подлиннике „истинной". (*Прим. ред.*)

видно из той критики, которой подверглись многие метеорологические данные, собранные без особых предосторожностей. 3) Термометр, определяющий температуру воздуха, должен быть по возможности удален от почвы, от наблюдателя и от всех предметов, имеющих самостоятельную температуру. При приближении наблюдателя он повышается, при приближении к почве он или повышается, или понижается, смотря по тому, температура почвы выше или ниже, чем воздуха. Один из важнейших недостатков обычных гипсометрических определений состоит именно в том, что в них неизбежно должно пользоваться показаниями термометра, находящегося близ почвы, тогда как вес столба воздуха, находящегося между станциями наблюдения, зависит от температуры воздуха, менее зависящей от влияния почвы, чем температура, показываемая термометром.

Подробности, касающиеся этого предмета, равно как и относящиеся до определения влажности воздуха, желающие найдут в любом курсе метеорологии, напр. в весьма солидном и образцовом труде Шмида „Lehrbuch der Meteorologie" (Leipzig, 1860) или в новейшей метеорологии Мона, перевод которой скоро должен явиться на русском языке.

Я рассмотрел барометрические поправки в подробности, потому что от определения разностей барометрических высот преимущественно зависит определение высот, тогда как влияние погрешностей определения температуры и влажности воздуха менее значительно, а потому рассмотрение всех подробностей, относящихся до их определения не может входить в предмет этой статьи.

Прибавление 1-е. *Способ Браве для определения толщины стен и внутреннего диаметра барометров.*

Из „Annales de chimie et de physique" (1842, 3 сер., т. 5, стр. 504)

При введении капиллярной поправки (стр. 113), а также для определения емкости торичеллиевой пустоты (стр. 109) необходимо знать толщину стенок или внутренний диаметр трубки. Наружный диаметр можно легко и точно измерить, а потому, если известна толщина стенок, узнаем и внутренний диаметр. Когда приготовляют барометр, можно легко и точно определить и внутренний диаметр трубки и толщину ее стенок, но необходимо иметь возможность достичь такого определения с наполненным барометром, потому что нередко при изготовлении прибора не сделано надлежащего определения. Для этого удобоприменим и достаточно точен способ Браве, по которому определяется именно толщина стенок. Вот как описывает Браве этот способ.

„Для определения толщины стенок барометрической трубки должно сделать на наружной поверхности трубки две тонкие,

параллельные, прямые и поперечные черты. При некотором навыке легко достичь этого с помощью острого кусочка горного хрусталя (кварца, кремня), захватив его концом щипчиков. Расстояние линий, которое может быть около 1—2 мм, должно быть точно измерено. Для этого может служить даже хороший циркуль и нониус барометра. Этот последний кладется затем горизонтально для облегчения дальнейших действий. Тогда от обеих черт, a и b, получается кроме прямого изображения еще второе, отраженное от зеркальной поверхности ртути, прилегающей к внутренней поверхности трубки. Поэтому есть возможность так поместить глаз, что прямое изображение черты a совпадет с отраженным изображением черты b или черта b с отраженною a. Назовем теперь чрез i и r углы, образованные нормалью к поверхности трубки с лучом, проходящим в воздухе и в стекле. Далее назовем чрез l показатель преломления света при прохождении света из стекла в воздух, чрез d расстояние линий a и b друг от друга и пусть x есть искомая толщина стеклянной трубки. Имеем:

$$x = {}^1/_2\ d\ \operatorname{ctg}\ (\arcsin\ l\ \sin\ i).$$

Для определения угла падения i можно употребить экран, двигающийся параллельно трубке барометра и которого передний верхний край срезан перпендикулярно оси трубки и параллельно чертам a и b. Экран должно поместить сперва так, чтобы луч зрения, в коем совпадает прямое изображение a с отраженным b, проходил по переднему краю этого экрана. Затем экран должно передвинуть до того, чтобы передний его край был на пути того луча, при котором отраженное изображение черты a совпадает с прямым изображением черты b. Если M есть расстояние, на которое должно передвинуть экран для того, чтоб попасть в два указанные положения, и если m есть расстояние экрана от наружной стенки барометрической трубки, то очевидно мы имеем:

$$\operatorname{tg} i = \frac{M - d}{2\ m}.$$

Если экран скользит по медной линейке, то легко может случиться, что эта линейка не совершенно параллельна с барометрической трубкою; но и тогда предшествующая формула приложима, если для определения величины m измерять расстояние от средины пути экрана до пространства, среднего между чертами a и b. Часто можно так сделать, чтобы экран скользил прикрепленный к верньеру, двигающемуся на шкале. Тогда величина M определяется легко из двух отчетов, сделанных при нуле верньера. Что касается до показателя преломления l, то

для обыкновенных сортов стекла он изменяется от $\frac{100}{150}$ до $\frac{100}{155}$.[1] Испытывая трубки заранее известной толщины, легко убедиться, что значение $l=\frac{100}{150}$ ближе отвечает действительности, по крайней мере для трубок, изготовляемых во Франции. Применяя это число, получаем толщины x, чрезвычайно близкие к действительным. Применяя число $l=\frac{100}{155}$, получаем x выше действительности на 0.05 до 0.08 мм. Однако и эти ошибки сами по себе незначительны.

Наиболее пригодное расстояние черт d лежит в пределах от 0.6 x до 1.6 x. Лучше, если вместо двух линий a и b начертить три a, b, c, что дает возможность иметь три комбинации данных при трех углах падения".

Этот способ определения, данный Браве, мною был неоднократно испытан и всегда давал показания отчетливые и согласные с действительностью. Приведя его здесь, я имею в виду содействовать его распространению и указать на него как на простое и очень доступное средство узнать с достаточною во многих случаях точностью показатель преломления стекла в трубках.

Прибавление 2-е. *О депрессии ртути в трубках.*

Весьма важное значение, какое имеет капиллярная поправка на результат многих наблюдений, в которых приходится определять давление 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 ω), т. е. 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 в статье, выше цитированной в 1-м прибавлении.

Желая восполнить сведения о депрессии и руководствуясь ныне господствующим представлением о состоянии поверхностей жидкостей, я считал полезным получить новые, возможно точные

[1] Бывают барометры из свинцового стекла, но реже. Тогда l иное.

измерения депрессии ртути в разных условиях. Начало наблюдений 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 краткого и предварительного из них извлечения, в котором взяты средние, интерполированные по отношению к высотам менисков:

Высоты мениска в миллиметрах

Диаметр трубки	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 по ныне существующим теоретическим представлениям (стр. 109), 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 (стр. 113) и по теории капиллярности следует, что с возрастанием высоты мениска это частное уменьшается (напр. для диаметра 6 мм от 1.21 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 здесь 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) проф. 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.

Определение давлений анероидами

Анероидные барометры, даже те, которые имеют довольно большие размеры, представляют сравнительно с ртутными барометрами весьма важное преимущество: легкость переноски и обращения с ними, что весьма важно в гипсометрических определениях, совершаемых во время путешествий. Многократно было замечено, что анероидные барометры претерпевают со временем некоторые изменения, притом нередко полагают, что эти изменения не имеют никакой правильности, и потому не придают анероидным наблюдениям никакого достоинства.[1] Это мнение в последние годы стало заменяться другим, более правильным, состоящим в том, что анероидные барометры, в которых механизм упрощен и сделан хорошо, претерпевают после изготовления некоторые изменения, но затем они прекращаются, и анероид приобретает постоянство до тех пор, пока не будет подвергнут некоторым быстрым изменениям температуры или быстрым движениям, сильным ударам и т. п. Это справедливо, однако, только для анероидов, предварительно тщательно изготовленных и полученных от лучших мастеров. Если коробка анероида (Види) заключающая пустоту и изменяющая форму при перемене давления, или изогнутая, внутри пустая пластинка, как в анероидах Бурдона, сделаны из очень тонкого металла, то конечно возможны перемены в анероиде, зависящие от изменения формы самого резервуара пустоты. Вначале изменения происходят с этим резервуаром только потому, что при спаивании, ковке и т. п. операциях металл приобретает натяжение частей, со временем уничтожающееся. Главный недостаток большинства анероидов состоит,

[1] Встречаются, однако, еще и ныне совершенно негодные для пересылки анероиды, когда зубчатые сцепления столь плохо выполнены, что при переноске или даже при быстром изменении давлений совершается перескакивание на целый зубец или два; но это бывает только у приборов, вышедших из рук дурных мастеров.

однако, не в недостатках резервуара, а в несовершенстве устройства тех частей, которые передают небольшие изменения формы резервуара указательной стрелке, движущейся по циферблату анероида. Эти части по существу своему должны быть сделаны легкими, а потому тщательная отделка их затруднительна; оттого-то нередко встречаются анероиды, в которых зубчатые сцепления так мало совершенны, что при данном давлении стрелка анероида получает довольно различные положения при легком ударе о прибор. Такие анероиды, в которых перемена в положении стрелки при этом ограничивается десятыми долями миллиметра, могут быть считаемы инструментами, надлежащим образом сделанными; если же при легком ударе об анероид стрелка его может переменять свое положение на несколько миллиметров, то, очевидно, нельзя полагаться на показания такого прибора.

К недостаткам устройства механизма анероидов должно отнести также и то обстоятельство, что при вертикальном положении циферблата стрелка анероида дает различные показания при обращении анероида около своего центра. Зависит это от того, что движущиеся части анероида не уравновешены противовесами или это достигнуто не в надлежащей мере. По этой-то причине необходимо производить наблюдения с анероидами не иначе, как поместив их горизонтально так, чтобы стрелка двигалась в горизонтальной плоскости и, следовательно, чтобы ось стрелки была вертикальна. Это замечание имеет практически ту важность, что несоблюдение упомянутого условия, — а его знают, кажется, очень немногие, — может заставить принять вполне удовлетворительный анероид за непригодный к делу, и я думаю, что чересчур строгий приговор многих наблюдателей относительно достоинств анероидов зависит от незнания выше указанной предосторожности. Судя по сказанному, при выборе анероидов должно наблюдать следующие два признака хорошего устройства этих приборов.

1) В вертикальном положении циферблата при вращении анероида около горизонтальной оси показания стрелки должны меняться незначительно.

2) При горизонтальном положении циферблата легкие удары об анероид должны ничтожно мало менять положение стрелки.

Помимо высказанных, главный недостаток анероидов выставляют в том, что это суть приборы чисто качественные, т. е. такие, показания которых сами по себе не имеют абсолютного значения, а приобретают его только по сравнению с барометрами, надлежащим образом выверенными. Надо заметить однако в этом отношении, что и обыкновенный ртутный барометр должен быть изучен, как было описано выше, для того, чтобы его показания приобрели абсолютное значение, так что в этом отношении разница между анероидными и ртутными барометрами сравнительно

не велика и состоит только в том, что при изучении анероидных барометров нужно уже предварительно иметь заранее изученный ртутный барометр. Изучение анероидного барометра должно разделить на две части: 1) изучение соответствия делений с давлениями при некоторой определенной температуре и 2) определение влияния температуры на показания анероида. Для определения соответствия между делениями анероида, назначаемого для гипсометрических измерений, и истинными давлениями необходимо прибегнуть к помощи воздушного насоса, позволяющего производить разрежение воздуха единовременно в барометре и в колоколе, содержащем анероид. Для этого колокол воздушного насоса, под которым помещен анероид, должно сообщить герметически с открытою ветвью барометра и сперва при атмосферном давлении, а потом при разных разрежениях сличить показания анероида с показаниями барометра. Барометр для этой цели конечно необходимо иметь сифонный; в случае же крайности можно обойтись открытым манометром, и тогда о давлении, существующем под колоколом воздушного насоса, должно будет судить по разности высот ртути в барометре и в открытом манометре, но при этом погрешность в определении давления будет двойная. Колокол воздушного насоса, а следовательно и анероид при таком сличении должны быть по возможности сохраняемы при некоторой определенной температуре, и для строгости соблюдения этого условия лучше, если колокол будет окружен водою и под ним помещен ртутный термометр. Такие же точно сличения должно произвести еще при некоторых других, по крайней мере двух температурах, ниже обыкновенной и выше ее, дабы узнать, какое показание дает анероид при различных температурах. После такого сличения составится таблица анероидных поправок по отношению к ртутному барометру и данной широте места. Чтобы получить затем показания анероида приведенными к широте 45°, должно показания ртутного барометра исправить по отношению к географической широте места и по его высоте над уровнем океана по способам, выше описанным. Если ввести раз в поправку анероида эти исправленные величины, то затем показания анероида не должно исправлять ни по отношению к широте, ни по отношению к высоте места, потому что *показания анероидного барометра не изменяются с переменою напряжения тяжести,* как в этом отношении меняются показания ртутного барометра. Это зависит оттого, что с переменою напряжения тяжести вес ртути изменяется, а упругость резервуара анероида от этой причины не изменяется. Температурная поправка анероида имеет двоякое значение: в анероидах, резервуар которых заключает действительную пустоту или газ весьма мало упругий, показания при разных температурах меняются только вследствие перемены упругости пластинки от ее на-

гревания и вследствие перемены длины тех передаточных частей, которые движут стрелку анероида. Если в резервуаре анероида оставлен воздух, имевший некоторую, хотя и незначительную, упругость, а тем более, если в резервуаре анероида находится насыщенный влагою воздух, то показания прибора будут иначе и неправильнее изменяться с температурою вследствие перемены упругости воздуха и пара, заключенного в резервуаре. [1] Нередко при самых анероидах находится термометр, служащий для такой поправки. Но лучше, если термометр отделен от анероида, ибо его тогда можно подвергнуть более полной проверке. [2] Во всяком случае, как при изучении анероидов, так и при пользовании ими, необходимо наблюдать, чтобы перемены температур и давлений совершались не быстро, потому что при быстрых изменениях форма резервуара может перемениться (произойдет остающаяся деформация).

Заметим еще, что в последнее время Гольдшмидт, Рейтц и др. приготовляют такие анероиды, в которых нет зубчатых сцеплений, как в обыкновенных, а потому показания в таких анероидах менее зависимы от качества конструкции, чем в обыкновенных. Особенно хороши приборы Deutschbein в Гамбурге системы Рейтца. Чувствительность достигается через увеличение отчета микроскопом.

Тщательно изученный анероид должен быть, во всяком случае, время от времени проверяем сличением с ртутным барометром, потому что нельзя быть уверенным в совершенной неизменности нежных органов, заключающихся в этом приборе. Они могут подвергнуться механическим изменениям, и это составляет существеннейший недостаток анероидов. Сверх того бывают иногда случаи, что пустой анероид начинает пропускать воздух, и тогда прибор должно совершенно переделать.

Применяя анероиды, тщательно изученные, к гипсометрическим определениям, должно пользоваться формулою, не содержащею множителей, относящихся к географической широте и высоте места наблюдения, потому что, как выше сказано, пока-

---

[1] Некоторые мастера готовят ныне анероиды, в которых температурные изменения компенсированы или малы. Таковы, напр., голостерические анероиды и др.

[2] Если t есть температура анероида, b — отчет, сделанный на нем, то весь результат изучения анероида можно представить, по крайней мере в большинстве случаев (когда пределы изменения давлений не велики и деления равномерны), вместо таблицы формулою вида:

$$H = b + x + yb + zt,$$

где H выражает истинное давление (приведенное к 0°), x, y и z суть три постоянных, характеризующих прибор и изменяющиеся с каждым прибором. Из этого очевидно, что нужны по меньшей мере три сличения (при двух различных давлениях и при двух разных температурах) с ртутным барометром для того, чтобы найти x, y и z.

зания анероида не меняются с изменением напряжения тяжести. Если таблицы поправок сделаны в данном месте, то хотя бы анероид затем и переменил свое положение по широте и высоте, должно пользоваться формулою, в которой вместо веса литра воздуха на экваторе e_0 должно поставить вес литра воздуха при широте и высоте того места, где сличение произведено.

Основное начало устройства дифференциального барометра

В основной формуле (I), а также и в гипсометрической формуле Бабине (XII), составляющей возможное упрощение полной формулы, очевидно, что разность высот определяется преимущественно величиною разности давлений (сумма давлений в формуле Бабине определяет среднюю плотность воздуха), а потому, чем меньшие разности давлений можно определять, тем меньшие можно определять и разности высот. При этом, если места A и B недалеки одно от другого и разность их высот невелика, то все условия полной применимости гипсометрической формулы будут в высшей мере выполнены, потому что наблюдения будут сделаны в близких местах одной атмосферной волны, а в них разность гидродинамических давлений близка к разности гидростатических давлений, ибо и качество восходящих токов, и относительное содержание влаги тогда будут сходны по качеству и близки по мере в обоих местах.

По этой причине должно ждать наибольшей применимости барометров к определению малых разностей высот для мест, близких между собою, а для того должно иметь чувствительные барометры, допускающие измерение малых разностей давлений. Постоянным барометрам, находящимся на одном месте, легко разными способами придать значительную чувствительность, а имея точные измерительные приборы (катетометры и нормальные метры), и при обычном устройстве барометров можно достигнуть такой точности отчета, что поднятие на доли метра будет ясно определяться. Но об обычных формах переносных приборов этого сказать нельзя; в их показаниях нельзя иметь уверенности за десятые доли миллиметра, особенно при узкой трубке. Тем более нельзя ждать большой точности от анероидов.

Назовем через D разность $H_0 - H_1$ давлений в первой и второй станциях наблюдений и посмотрим, насколько точность определения малых высот z зависит от точности определения этой разности, равно и от определения знаменателя, т. е. полусуммы барометрических давлений в обоих местах наблюдения. Сокращенная гипсометрическая формула, пригодная для малых высот, имеет такой вид:

$$z = 8000 \frac{D}{H}(1 + kT),$$

где H и T суть средние давления и температура наблюдений.

Если в D, т. е. в разности давлений, мы сделаем погрешность d и если погрешность в H назовем через h, а погрешность T обозначим через t, то возможная погрешность x в высоте z будет определяться суммой погрешностей от z по D, по H и по T, а потому

$$\pm x = z\left(\pm\frac{d}{D}\pm\frac{h}{H}\pm kt\right). \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad \text{(XVIII)}$$

Это выражение показывает, что:

1) Чем больше высота z, тем и во столько же раз, при прочих равных условиях, погрешность x становится больше. При малых высотах и абсолютная мера погрешности будет мала, хотя относительная $\frac{x}{z}$ и будет та же самая.

2) Если погрешность d разности давлений будет и невелика, то при малой разности давлений D, т. е. при малой разности высот, она будет иметь значительное влияние на результат z.

3) Совсем иное отношение представляет погрешность h в определении всего давления H, ибо оно и при малых и при больших высотах остается почти постоянным и притом значение h входит деленным на значительную величину H, а потому даже грубая ошибка в H будет иметь меньшее влияние на z, чем гораздо меньшая величина погрешности d в D. В примере это будет ясно.

Если H будет около 750 мм ртутного столба, то, выражая z в метрах и считая $t = 0^0$, получаем $z = \frac{8000}{750}D = 10.67\,D$ или $\frac{z}{D} = 10.67$, если D выражена в мм ртутного столба. Следовательно, если $d = 1$ мм, то от того при всяком z получится погрешность $x = 10.67$ м, если же погрешность h примем $= 1$ мм, то при высотах от 0 до 100 м от этого родится погрешность x не более как в 0.13 м, т. е. незначительная по отношению к предшествующей. Оттого разность давлений, особенно при малых высотах, должно определять с возможно большею точностью.

Поэтому главное внимание наблюдателя при определении высот с помощью барометров должно быть обращено на определение разности давлений, и такие барометры, которые могут дать эту разность давлений в двух местах с большою точностью, могут служить для точного определения разности высот, хотя бы при этом все атмосферное давление и было известно с малою точностью.

Вот основное начало, по которому должно стремиться устроить для гипсометрических целей такие барометры, в которых разность давлений определяется с большою тщательностью. Тогда с помощью такого барометра в предыдущей формуле определится

величина D, при помощи же анероида или другого барометра, дающего давление H, хотя бы и с небольшою точностью, может быть определено значение z в предшествующей формуле. Ни ртутные барометры, ни анероиды по многим вышеисчисленным причинам непригодны для точных определений малых разностей D давлений. Стрелка анероида от легкого удара переменяет положение на десятые доли миллиметра, а потому точность отчета не может превышать десятых долей миллиметра, а следовательно определение высот в метрах будет заключать уже погрешность. То же самое должно сказать и о ртутных барометрах. Там приходится определять большие столбы, т. е. большие высоты ртутного столба, для того чтобы получить небольшие величины D. Поправки, необходимые в ртутных барометрах, таковы, что достигают целых миллиметров (такова, напр., температурная поправка), а сомнительность этих поправок (особенно капиллярной, термометрической и на упругость воздуха в пустоте) часто не позволяет ручаться за определение давлений и разностей их по крайней мере до десятых долей миллиметра.

Итак, важнейшую задачу применения барометров к определению малых высот составляет определение малых перемен давлений, чего нельзя сделать при помощи обыкновенных барометров. Определение малых разностей давлений весьма легко может быть произведено с замкнутою массой воздуха, сохраняющего определенную температуру. Представим себе, что некоторый объем воздуха V при начальном давлении H, выраженном в килограммах на кв. метр (а не в миллиметрах ртутного столба, следовательно H близко к 10000) заключен в сосуд, сообщающийся с открытым манометром, в котором находится легкая жидкость, имеющая плотность s (вес куб. метра в килограммах, для ртути = 13 596, для воды 1 000, для нефти около 850), и одна ветвь этого манометра сообщается с сосудом, содержащим замкнутый воздух, а другая открыта в атмосферу. Если атмосферное давление равняется упругости запертого воздуха H, то на жидкость, заключающуюся в манометре, с обеих сторон будут действовать одинаковые давления, а потому уровни ее в обеих ветвях манометра будут лежать в одной горизонтальной плоскости. Если затем атмосферное давление переменится, напр. через поднятие прибора на некоторую высоту, и станет H_1, то уровни жидкости в манометре не могут оставаться в прежнем положении, и если давление $H_1 >$ давления H, то в открытой ветви манометра жидкость опустится, а в закрытой поднимется. Воздух, запертый в сосуде, теперь будет иметь уже другой объем и будет представлять иную упругость. Объем при этом уменьшится, а через то упругость увеличится. Если предположим, что манометр представляет совершенно цилиндрическую форму, чего в действительности можно достигнуть в достаточном совершенстве, взяв

для манометра стеклянную трубку довольно равномерного диаметра, и если объем одного деления на манометре будет равен v, а разность уровней жидкости в манометре h, то уменьшение объема, происшедшее через поднятие жидкости во внутренней ветви манометра, будет равно $\frac{h}{2} v$. Следовательно, объем воздуха в сосуде будет теперь

$$V - \frac{hv}{2}.$$

То давление, под которым будет находиться этот объем воздуха в сосуде, будет очевидно меньше, чем давление H_1 наружного воздуха, потому что поднявшийся во внутренней ветви манометра столб жидкости производит уменьшение давления и, если давления выражены в килограммах на кв. метр и h в метрах, то этот поднявшийся в манометре столб жидкости будет оказывать отрицательное давление, равное hs, следовательно давление, под которым находится запертый воздух, теперь будет равно $H_1 - hs$. По закону Мариотта следует, что для данной массы газа произведение из объема на давление или упругость есть величина постоянная при всевозможных изменениях объемов и давлений, если температура остается та же самая. Закон этот хотя и не совершенно точно справедлив, но отступления от него ничтожно малы и при малых переменах давлений не могут быть наблюдаемы даже при самых точных средствах, к тому применяемых, а потому для замкнутой массы воздуха можно принять этот закон вполне справедливым, следовательно:

$$VH = (V - \frac{h}{2} v)(H_1 - hs).^1$$

---

[1] В это уравнение должно внести еще одну небольшую поправку, зависящую от того, что переменилось положение уровней жидкости в манометре, а потому веса столбов воздуха, в манометре заключенного, подверглись изменению. Когда объем был V и давление H, в обеих ветвях манометра находились столбы воздуха одинаковой высоты, а когда уровни жидкости в манометре переменились, в открытую ветвь манометра вошел столб воздуха высотою $\frac{h}{2}$, а из той ветви манометра, которая соединена с прибором, вытеснился такой же столб воздуха, следовательно давление, действующее снаружи, увеличилось весом столба воздуха, имеющего высоту h. Если обозначим через e плотность воздуха, в манометре заключенного, а именно вес куб. метра воздуха, то вес столба, увеличивающего давление, будет равен, в килограммах на кв. сантиметр, произведению eh. Следовательно предыдущее уравнение в полном своем составе получит вид:

$$VH = (V - \frac{h}{2} v)[H_1 - hs + he];$$

при этом H и H_1 относятся к данному уровню или сечению прибора (напр. к тому месту, где на манометре 0).

Поэтому вместо истинной плотности s должно в предшествующую формулу вводить значение плотности жидкости за вычетом плотности воздуха, т. е. ту

Предшествующему уравнению легко придать следующий вид:

$$1 = (1 + \frac{H_1 - H}{H} - \frac{h}{H} s)(1 - \frac{hv}{2V}) .$$

Из этого уравнения можно определить значение разности давлений $H_1 - H$, если знать: 1) начальное давление H; 2) отношение объемов $\frac{v}{V}$; 3) плотность s жидкости, в манометре заключенной, и 4) если наблюдать разность уровней в манометре h. Пренебрегая малыми величинами (высшего порядка):

$$H_1 - H = hs + H\frac{hv}{2V} .$$

При этом пренебрегается членами, имеющими малую величину, а именно:

$$(H_1 - H)\frac{hv}{2V} - \frac{h^2vs}{2V} \quad \text{или} \quad \left(\frac{hv}{2V}\right)^2 H.$$

Члены эти в действительности будут очень малы, если отношение $\frac{v}{V}$ будет мало, т. е. если объем сосуда, заключающего воздух, будет велик сравнительно с тем изменением объема $\frac{hv}{2}$, которое происходит с воздухом, а это в практике достижимо.

Притом практически возможно достигнуть еще и того, чтобы объем воздуха, заключенного в сосуде, вовсе не переменялся во время перемены давления. Так, напр., если $H_1 > H$, то можно достигнуть неизменного объема, убавив количество жидкости, в манометре заключенной. Чрез это оба ее уровня понизятся, и во внутренней ветви манометра можно это понижение довести до того, чтобы уровень вновь был на том месте, где он был первоначально. Тогда объем воздуха будет во втором случае равен тому, который был в первом. При этом основное уравнение приобретет вид:

$$HV = V(H_1 - hs),$$

а потому тогда:

$$H_1 - H = hs,$$

величину плотности жидкости, которая получается обыкновенно при взвешивании, а потому при определении плотности жидкости, заключающейся в манометре, если сделана поправка на взвешивание в воздухе, должно от полученной плотности отнять плотность воздуха; если же поправки на взвешивание в воздухе не сделано, то должно прямо брать плотность не исправленную. Мы такую плотность s нефтяного масла и будем подразумевать во всем дальнейшем изложении. Так как вес куб. сантиметра самых легчайших жидкостей не менее 600, а плотность воздуха только 1.2, то указанная поправка имеет только второстепенное значение. В точных определениях эту поправку, однако, необходимо принимать во внимание.

т. е. тогда, зная величину столба h, прямо узнаем перемену давлений. Оба способа сближаются между собою, если член, заключающий $\frac{v}{V}$, будет сделан весьма малым. Такой способ практичнее и теоретически общнее, а потому в дальнейших соображениях мы будем останавливаться преимущественно на нем. Он важен потому еще, что ясно показывает зависимость определения разности давлений от начального давления, если температура неизменна. Когда отношение $\frac{v}{V}$ мало, влияние определения H на результат наблюдения будет очень мало, и следовательно грубая погрешность в определении H не будет иметь большого влияния на точность определения разности давлений $H_1 - H$.

Вот основное начало устройства прибора, который называется *дифференциальным барометром*. Дифференциальный барометр, устроенный мною специально для определения разности давлений при нивелировании, назван высотомером и далее будет в подробности описан.

Обратим теперь внимание на то влияние, которое может оказать изменение температуры на результат наблюдения. От перемены температуры упругость воздуха, запертого в сосуде, изменится, и следовательно при переменной температуре результат будет зависеть не только от одного изменения давления, но и от изменения температуры. Закон Гей-Люссака дает возможность узнать зависимость между изменением давления и изменением температуры, а потому можно принять во внимание температурное изменение, составив следующее основное выражение, понятное без дальнейшего объяснения:

$$\frac{VP_1}{1+kT_1} = \frac{(V-\frac{p}{2}v)(P_2-ps)}{1+kT_2-l(T_2-T)} \quad \ldots\ldots \text{(XIX)}^1$$

При этом через k означается коэффициент расширения воздуха 0.003684, чрез l коэффициент расширения сосуда, для латуни $= 0.000054$ ($k-l=0.00363$), чрез T_1 — температура воздуха в то время, когда его объем был V, а давление было P_1, когда и уровни жидкости в манометре были одинаковы, а чрез T_2 означается температура в то время, когда в манометре наблюдалась высота p м, а наружное давление стало $= P_2$. Это уравнение легко преобразуется в следующий вид, причем пренебрегается, как и при предшествующем преобразовании, произведением малых величин одной на другую и разность температур $T_2 - T_1$ считается малою: [2]

[1] В подлиннике стоит „*U*“ (*Прим. ред.*).

[2] Не забудем, что при составлении формул мы считали h и p положительными, когда атмосферное давление возрастает, т. е. когда во внутренней ветв

$$P_2 - P_1 = ps + P_1 \frac{p}{2} \frac{v}{V} + P_1 \frac{k-l}{1+kT_1}(T_2 - T_1).$$

Здесь $P_2 - P_1$ выражено в килограммах на кв. метр, s есть вес куб. метра манометрической жидкости в килограммах, а p — высота нефти в метрах. Если мы желаем выразить разность давлений в миллиметрах ртутного столба $H_2 - H_1$, то должны тот член (ps), где нет величины P, разделить на 13.596, ибо $P = 13.596\,H$, если H выражено в миллиметрах. Если сверх того высоту столба нефти p измерить также в миллиметрах ($h = 1000\,p$), а удельный вес s нефти оставим выраженным по прежнему в килограммах, то предшествующая формула приобретает вид

$$\underbrace{H_2 - H_1}_{\text{Разность давлений в мм рт. ст.}} = \underbrace{\frac{s}{13596}h}_{\text{Член, определяемый по высоте } h \text{ мм манометрич. жидкости, коей куб. м весит } s \text{ кг}} + \underbrace{H\frac{h}{2}\frac{v}{V}}_{\text{Член, зависящий от емкости } v \text{ 1 мм манометрической трубки и } V \text{ объема воздушного резервуара}} + \underbrace{H_1\frac{k-l}{1+kT_1}(T_2 - T_1)}_{\text{Член, определяемый по изменению температуры } t = T_2 - T_1} \quad . \; . \; . \; (XX)$$

Вот то полное выражение, в котором приняты во внимание все обстоятельства, необходимые для получения понятия по наблюденной вместе h о разности давлений $H_2 - H_1$.[1]

Из этого выражения очевидно, что когда температурное изменение $(T_2 - T_1)$ довольно значительно, то необходимо точно знать и начальное давление H_1. Если же оно не велико, то значительная погрешность в H_1 не будет иметь влияния на результат наблюдения. Следовательно, необходимо иметь возможность определять температурные изменения с большею точностью и стремиться к тому, чтобы температура менялась весьма мало. Если произойдет значительное изменение температуры, то, охлаждая или подогревая сосуд, заключающий воздух и термометр, можно довести эту температуру почти до первоначальной, так что $T_2 - T_1$ будет иметь в действительности небольшую величину. Но эти небольшие изменения температуры надо знать во всяком случае с большою точностью, потому что они входят умножен-

манометра нефть стоит выше, чем в наружной; при уменьшении наружного давления, т. е. когда в наружной ветви нефть будет выше, h или p должно считать отрицательным.

[1] Сосуды высотомеров обыкновенно делаются из латуни, коэффициент кубического расширения рабен 0.000054, следовательно вместо истинного коэффициента расширения воздуха $k = 0.0003684$ должно в числитель поставить величину $k - l = 0.0000363$, и потому эту величину будем дальше подразумевать вместо $k - l$, считая $k = 0.003684$, когда от общих выражений будем переходить к частным примерам.

ными на начальное давление, и в нашем распоряжении не остается другого средства для уменьшения температурного члена, как уменьшить $T_2 - T_1$, тогда как член $H\frac{h}{2}\frac{v}{V}$ мы можем уменьшать двояко: или переливая и отливая нефть, или уменьшая $\frac{v}{V}$.

Из предшествующих соображений легко вывести следующие заключения: 1) дифференциальный барометр должен быть снабжен манометром, емкость v одного деления которого должна быть по возможности мала относительно емкости V всего сосуда, заключающего воздух; 2) при дифференциальном барометре должен находиться очень чувствительный термометр, могущий показывать малые изменения температуры; 3) необходимо, чтобы температура сосуда, заключающего воздух, соответствовала температуре термометра в возможном совершенстве; 4) жидкость, заключенная в манометре, должна быть трудно летучею, так, чтобы упругость ее пара при небольших изменениях обыкновенных температур не была вовсе ощутительна; 5) воздух, замкнутый в сосуде, должен оставаться в своей массе неизмененным до того времени, когда нужно определить разность давлений; 6) сосуд с воздухом при начальном давлении должно сообщить с атмосферным воздухом для того, чтобы при этом начальном давлении уравнялась упругость воздуха, заключенного в сосуде, с упругостью атмосферного воздуха.

Без удовлетворения этим основным требованиям дифференциальный барометр не может показывать с точностью малых перемен давления. Задача устройства дифференциального барометра и состоит именно в достижении этих основных требований способами, доступными для практики, в которой необходимо, чтобы прибор, назначенный для определения высот, был сверх того легко переносим с одного места на другое, а следовательно не тяжел и не ломок. Вышеупомянутым основным требованиям я старался удовлетворить в высотомерах, устраиваемых мною следующими способами.

1) Для приборов неподвижных, т. е. для наблюдения на одном месте, легко устроить воздушный резервуар больших размеров, но в переносном приборе большой сосуд занял бы много места, а потому нужно было найти соответственные размеры сосуда по размерам стеклянных трубок, встречающихся в практике и имеющих притом возможно равномерный диаметр. Такие трубки легко находятся, если их диаметр будет около 2 мм. При диаметре в 2 мм один миллиметр высоты трубки будет заключать объем в 0.003 куб. см. Если сосуду, заключающему воздух, придать объем в 300 куб. см, то множитель $\frac{v}{V}$ (в XX) будет мал и равен 0.00001. Избрав трубки в 2 мм диаметром, я придаю сосуду с воздухом в обыкновенных высото-

мерах размеры бо́льшие, чем 300 куб. см, а потому частное $\frac{v}{V}$ приобретает в действительности малую величину. Форма сосуда с воздухом не безразлична. Чтобы придать ему уместительность, необходимую для переносного сосуда, и в то же время сделать его таким, чтобы воздух в нем быстро принимал температуру воды, в которую погружен сосуд, я придал сосуду с воздухом форму кольцеобразного цилиндра, составленного из двух толстостенных тянутых латунных трубок, спаянных между собою вверху и внизу кольцеобразными днами. Такой сосуд виден на прилагаемом чертеже, фиг. 1, где он обозначен буквами *A*, *A*. Кольцеобразная форма сосуда дает возможность не только легко нагреваться воздуху, помещенному в пространстве *A A*, но еще сверх того делает весьма удобным устройство мешалки для воды, в которую погружен сосуд *A*, ибо эта мешалка *OO* помещается здесь симметрически внутри сосуда.

2) Обыкновенные ртутные термометры не только весьма ломки для переноски, но и неудобны в том отношении, что при значительной чувствительности имеют весьма большую длину. Нельзя ограничиваться в практике нивелирования чувствительными термометрами, дающими показания только на нескольких градусах, как это делается в лабораториях, где температура комнат, в которых производятся работы, подвергается малым изменениям. В практике нивелирования температуры будут меняться так же, как и температуры воздуха, напр. от —10 до +30°. Если чувствительный термометр снабдить такими делениями, чтобы каждое соответствовало $^1/_{40}$ доле градуса Цельсия, то при 40° изменения на термометрической шкале должно было бы быть нанесено 1 600 делений. Наименьшее расстояние между ними, хорошо видимое простым, невооруженным глазом, должно быть не менее $^1/_8$ мм, а потому такой термометр должен был бы иметь длину более полуметра, следовательно должен был бы иметь ценность весьма значительную и ломкость непомерную. Когда дифференциальный барометр назначается для наблюдений при некоторой одной температуре или при небольшом изменении температур, напр. в комнате, то можно ограничиться чувствительным термометром, имеющим немногие градусы комнатной температуры; но для работ в поле необходимо иметь несколько таких термометров с разными температурами (напр. от —15 до 0°, от 0 до 10°, от 10 до 20° и от 20 до 30°) или же придать термометру новое устройство. Несколько чувствительных термометров, сравненных между собою, представляют ценность чрезвычайно большую, и за точность этих приборов все-таки мало можно было бы ручаться. Желаемая цель была достигнута устройством нового вида термометров, которые названы мною *дифференциальными термометрами*, хотя это устройство

и отличается от обычного устройства дифференциальных термометров во многих отношениях и даже в самом принципе. Принцип состоит в том, что в моих дифференциальных термометрах заключается разное количество жидкости, смотря по той начальной температуре T, от которой исходят на опытах. Точно так, как начальное давление H нет нужды знать с большой точностью, как выше было описано, так и первоначальную температуру T нет необходимости знать с большою точностью; нужно, напротив того, знать небольшие изменения температуры $T_2 - T$ со всею возможною тщательностью. Представим себе, что мы имеем термометр, резервуар которого сообщается с другим сосудом, наполненным тою же жидкостью, которая находится в термометре; изберем притом эту жидкость между такими, которые представляют значительный коэффициент расширения; у меня взята нефть, коэффициент расширения которой почти в 5 раз больше, чем ртути. Вообразим далее, что между сосудом, с которым сообщен резервуар термометра, и этим последним находится кран. Запрем при некоторой начальной температуре T этот кран и таким образом оставим в термометре некоторое количество жидкости; она может расширяться, и по капиллярной трубке, находящейся при термометре, можно узнать изменения в температуре, которые произойдут, начиная от температуры T, если мы заметим, на каком делении был уровень жидкости в термометрической трубке при температуре T и на каком он будет тогда, когда произойдет перемена температуры.

Если затем упомянутый выше кран открыть, то часть жидкости, заключающейся в термометре, или перейдет в сообщающийся сосуд, или из этого последнего поступит в термометр, смотря по тому, каковы будут уровни жидкости в сообщающемся сосуде и в капиллярной трубке термометра, если эта последняя, равно как и сообщающийся сосуд, оба открыты и находятся под одним и тем же давлением.

Следовательно, очевидно, что при всякой начальной температуре и при открытом кране положение жидкости в капиллярной трубке или одно и то же, или почти одно и то же. Если же кран закрыт, то будут происходить обычные изменения уровня жидкости в капиллярной трубке и, следовательно, будут заметны малые изменения температуры, если резервуар термометра имеет значительную величину и если жидкость представляет большой коэффициент расширения, а капиллярная трубка имеет относительно малый диаметр. Таким образом, легко достигнуть того, что малые изменения температуры могут быть измеряемы небольшою капиллярною трубкой при всевозможных начальных температурах. Показания такого термометра будут иные, чем показания термометра при его обычном устройстве,

потому что, запирая кран при различных температурах T, мы получаем в термометре неодинаковые массы жидкости, и следовательно можно думать, что значение одного градуса будет при разных начальных температурах T более неодинаково, чем в обыкновенных термометрах. Однако при внимательном разборе сущности дела выгода оказывается на стороне описываемого устройства термометров против обычного, где масса жидкости неизменна. Зависит это от следующей причины: коэффициент расширения жидкостей, не исключая и самую ртуть, обыкновенно с повышением температуры не остается одним и тем же, а увеличивается, $V_t = V_0(1 + aT + bT^2 \ldots)$, и не равно, как у газов, $V_0(1 + kT)$, следовательно одинаковым приращениям температуры отвечают неодинаковые приращения объемов, а именно, по мере возвышения температуры одному градусу (а градус определяется воздушным термометром) отвечает все большее и большее увеличение объема жидкости. $\frac{dV_t}{dt}$ не есть постоянное и равное kV_0, как у газов, а есть функция температуры $= V_0(a + 2bT + \ldots)$. Это видно для ртути из следующего выражения ее кубического расширения: $V_t = V_0(1 + 0.0001801\,T + 0.00000002\,T^2)$, как показывает мой расчет опытов Реньо (Ж.Р.Х.Ф.О., физ. ч., 1875, стр. 75). [1] Будем, для простоты дела, считать резервуар термометра неизменяющимся в своей емкости при перемене температуры и примем емкость его равною 1 000 000. Пусть при 0° ртуть наполняет весь этот объем, при температуре T она сверх того займет объем

$$180.1\,T + 0.02\,T^2.$$

Это выражение показывает, что приращение объема не просто пропорционально возрастанию температуры, а превышает его, так что на каждый градус возрастающей температуры ртуть занимает все больший и больший объем. Так, возрастание объема на 1° около 0° = объему 180.1, около 10° = 180.5, около 20° = 180.9 и т. д. Если бы при этих температурах ртуть занимала первоначальный объем, т. е. 1 000 000, то эти изменения были бы менее быстры, а именно, на каждый градус изменение в объеме было бы равно $\frac{180.1 + 0.04T}{1\,000\,000 + 180.1T + 0.02T^2}$, напр. при 0° было бы 180.1, при 10° = 180.17, при 20° = 180.25. Уменьшая массу расширяющейся жидкости по мере возрастания температуры, мы уменьшаем и приращение объема, как и должно делать для достижения того, чтобы перемены объемов соответствовали переменам температур. Что справедливо для ртути, то справедливо и для всех других обычных жидкостей. В дифференциаль-

[1] Сочинения, т. V. (*Прим. ред.*)

ном термометре и производится такое уменьшение массы жидкости по мере возрастания ее температуры, а потому показания дифференциального термометра ближе к действительности, т. е. ближе к показаниям нормального воздушного термометра, чем показания обыкновенного термометра, где масса ртути остается при всех температурах одною и тою же. Должно заметить однако, что в обыкновенных термометрах редко принимают во внимание то различие в показаниях термометрической жидкости, которое существует при постоянной ее массе, т. е. редко сравнивают показания термометров с жидкостями с показаниями воздушного термометра. Если бы такое сравнение произвести при переменной массе жидкости и при постоянной, то и оказалась бы выгода дифференциального термометра. Он представляет еще и другие весьма существенные выгоды. Трубка дифференциального термометра при всех изменениях температуры остается одною и тою же, а следовательно остаются постоянными и те поправки, которые должно делать для того, чтобы наблюденное показание привести к истинным разностям объемов, а следовательно и температур. Устройство дифференциального термометра, применяемого мною к дифференциальным барометрам, видно на схеме в фиг. 1. Термометр представлен здесь в виде металлической медной трубки *LL*, извивающейся в виде змеевика вокруг воздушного резервуара *A*. В этой трубке и заключается жидкость, расширяющаяся от нагревания. Эта трубка *LL* сообщается с одной стороны с стеклянною термометрическою трубкою *NN*, которая открыта в воздух или может быть запираема пробкою *P*. С другой стороны, трубка *LL* сообщается с резервуаром жидкости *Q*. Сообщение между *L* и *Q* может быть или установлено, или прекращено при помощи открытия или закрытия крана *K*. Это есть металлическая винтовая затычка или кран, запирающийся при поворачивании ключа, надеваемого на головку *K*. Если кран отвернуть, то конический конец открывает сообщение между *L* и *Q*; тогда в капиллярной трубке *NN* уровень жидкости становится на тот же уровень или почти на тот же, как и в сосуде *Q*. Если кран *K* повертыванием запереть, то сообщение между *Q* и *L* прекращается, и тогда жидкость, запертая в *L* и отчасти в трубке *N*, будет при изменении температуры расширяться или сокращаться, а следовательно изменения температуры будут очевидны в капиллярной трубке *NN*. Пробка *P* служит для того, чтобы при открытом кране *K* можно было установить уровень жидкости в капиллярной трубке *NN* на желаемое положение. Если при открытом кране *K* поставить пробку *P* на место и немного ею надавить, то вследствие сгущения воздуха в пространстве под пробкою жидкость в *N* понизится и может стать на самое нижнее место капиллярной трубки. В это время кран *K* может быть закрыт и тогда при увеличении температуры полу-

чится бо́льшая шкала для расширения жидкости. Если же ожидается понижение температуры, то можно воспользоваться всею шкалой дифференциального термометра при помощи пробки *P* следующим образом: при закрытом кране *K* пробку должно поставить на место за некоторое время до открытия крана *K*: тогда давление воздуха, находящегося под пробкою, успеет уравняться с наружным, ибо пробка не запирает совершенно герметически отверстия термометрической трубки. Это можно узнать потому, что при открытии крана *K* тогда жидкость в капиллярной трубке не будет понижаться. Когда это достигнуто, тогда при отворенном кране *K*, выдвигая пробку из ее вместилища, можно действовать ею как поршнем и поднять жидкость до верхней части шкалы, а в это время запереть кран *K*. Тогда при начальной температуре *T* жидкость будет занимать наивысшее положение в капиллярной трубке, и следовательно на шкале еще будут видны сравнительно значительные понижения температуры. Устройство термометра в виде металлической трубки и змеевика доставляет еще ту важную выгоду, что такой трубчатый резервуар термометра весьма быстро принимает температуру ванны, в которую погружен, и следовательно температуру воздуха, заключающегося в сосуде *A*.

3) Для того, чтобы достигнуть полного соответствия между температурою воздушного резервуара *A* и термометра, необходимо поместить их в одну общую ванну с водою; на схеме, фиг. 1, она обозначена буквами *XY*. Должно стараться взять как можно бо́льшую массу воды для того, чтобы температура прибора изменялась как можно медленнее. Но в переносных приборах нельзя увеличивать массу воды иначе, как в ущерб легкости прибора, а потому должно ограничиваться сравнительно незначительным количеством воды. Эта последняя вливается в сосуд чрез особое отверстие *Z* и при всяком наблюдении должна быть подвергаема перемешиванию. Для этой-то последней цели и служит мешалка *OO*, помещенная в центре прибора. Ее ручка находится снаружи, а внутри она оканчивается металлическою пластинкой, разрезанною и изогнутою так, как это делается в оконных вентиляторах. Желая перемешать воду прибора, мешалку должно с некоторою быстротой поднимать снизу вверх и обратно. Вследствие той формы, которую имеет металлическая пластинка, при таком движении мешалки вода в приборе приобретает двоякое движение: во-первых, пластинка, двигающаяся во внутреннем цилиндре сосуда *A*, поднимает и опускает воду и следовательно заставляет внутреннюю воду смешиваться с тою, которая находится с наружной стороны сосуда *A*, а во-вторых, пластинка, вследствие изогнутости своих лопастей, действует, как винт, и заставляет поднимающуюся и опускающуюся воду приходить в круговращение. От совокуп-

ности этих двух движений вода перемешивается весьма скоро, и весь прибор принимает от того равномерную температуру. Если воду не взмешивать, то нижние части прибора всегда будут иметь несколько иную (низшую) температуру, чем верхние, а при боковом влиянии нагревания одна часть сосуда будет иметь другую температуру, чем остальные. Мешалки, подобные вышеописанной, оказались на практике чрезвычайно удобными для многих случаев. В некоторых других случаях мешалки такого же рода полезно приводить просто в быстрое круговращательное движение, как предложил Вейнгольд; тогда лопасти мешалки действуют, как винт.

4) Манометрическая жидкость, употребляемая мною, есть *тяжелое нефтяное масло,* получаемое способом, описанным в моем сочинении „Об упругости газов" (т. I стр. 127).[1] Это масло имеет, смотря по источнику, из которого оно добывается, и по тем температурам, при которых произведена перегонка его, различную плотность. Это недостаток манометрической жидкости; ртуть, вода, серная кислота, глицерин и другие определенные жидкости представляют в этом отношении бóльшую выгоду, потому что имеют определенный удельный вес. Употребляя нефтяное масло, нужно знать предварительно для данного нефтяного масла его удельный вес, но в самом приборе определить его весьма легко, как будет описано далее, а затем нефтяное масло представляет множество незаменимых выгод и между ними первая состоит в том, что легко получить такое нефтяное масло, которого упругость пара не больше, чем для ртути при обыкновенных температурах, так что его можно считать столь же пригодным для составления приборов, назначенных для изучения свойств газов, как и ртуть. Во-вторых, нефтяное масло — и это очень существенно — представляет при малом удельном весе, а именно: при удельном весе от 0.8 до 0.9, весьма большую подвижность, которой не имеют другие жидкости, мало летучие, напр. серная кислота, а в особенности глицерин и обыкновенные жирные масла: они пристают к стенкам, трудно стекают с них, легко включают в себя пузырьки воздуха и при охлаждении становятся еще более вязкими. Ни одного из этих существенных недостатков не имеет нефтяное масло или, правильнее сказать, оно их имеет в гораздо меньшей мере, чем упомянутые жидкости. Притом нефтяное масло не замерзает, не портится от влияния воздуха, *не поглощает влажности воздуха* (как то делают крепкая серная кислота или безводный глицерин) и не растворяет или, правильнее сказать, ничтожно мало растворяет воздух. Если для ясности отчета нефтяное масло окрашивается, то на красящее вещество, раство-

[1] Сочинения, т. VI, 1939, стр. 405. (*Прим. ред.*)

ренное в масле, действуют свет и воздух, а потому лучше избегать этого окрашивания, так как оно имеет значение только для ясности отчета.

5) Сосуд или резервуар с воздухом необходимо при самом составлении прибора испытать надлежащим образом относительно совершенной его герметичности. Стеклянные сосуды действительно герметичны, тогда как металлические должны быть в этом отношении непременно подвергнуты тщательному испытанию, потому что нередко тянутые металлические трубки, места спая и самый металл в тонких листах, если не будут весьма тщательно избраны, представляют небольшие отверстия, а при перемене давления через них может входить в сосуд воздух и вода, или будет выходить часть воздуха, а потому показания будут неправильны. Для испытания совершенной герметичности каждый сосуд должен быть испытан следующим образом: одно отверстие, напр. трубку *B*, должно соединить герметически с длинною, опускающеюся вертикально стеклянною трубкой; открытый конец этой последней погрузим в ртуть. Другое отверстие сосуда, напр. трубку *G*, должно соединить с краном и с воздушным насосом и выкачать воздух изнутри прибора. При этом ртуть в вышеупомянутой стеклянной трубке поднимется до некоторой высоты. Если кран запереть и сосуд оставить на долгое время, то уровень ртути в стеклянной трубке должен оставаться неизменным или, говоря точнее, должен изменяться только по мере изменения высоты барометра. Если есть малейшее отверстие, то в течение получаса времени, при той значительной разности давлений, которая существует при этом, внутрь сосуда взойдет столь большое количество воздуха, что ртуть значительно понизится. Должно однако заметить, что нередко в металле бывают отверстия столь незначительные, что только по истечении большого промежутка времени заметно понижение уровня ртути. При столь малых отверстиях сосуд необходимо вновь полудить, а иначе показания прибора нельзя считать совершенно точными при долговременном сохранении замкнутого в приборе воздуха.

6) Для того, чтобы иметь возможность в данное время или в данном месте приравнять атмосферное давление к упругости воздуха, заключающегося в сосуде дифференциального барометра, необходимо снабдить его краном, который при наблюдении уединяет или отрывает некоторую массу воздуха, заключенного в сосуде, от окружающего воздуха, а при открытии дает возможность давлению внутри и вне сосуда уравняться. Введение крана и дифференциального термометра в состав дифференциальных барометров составляет важнейшие особенности предложенного мною устройства. Обыкновенные краны представляют снаряды, очень трудно приготовляемые с надлежащею точностью,

т. е. редко запирают вполне герметически, а если это и достигается, то нет уверенности в том, что кран, действовавший некоторое время в совершенстве, современем не перестанет запирать герметически, потому что кран подвергается трению и содержит сало или спуск, могущие подвергаться изменению. По этой причине обыкновенные краны совершенно исключены мною из устройства высотомера; они заменены коническими запорами или винтовыми кранами. Такой запирающий кран в схеме, фиг. 1, обозначен буквою S, а винтовой его запор буквою R. Тонкая металлическая трубка G сообщает сосуд A с краном S, а именно с тою частью его, где имеется коническое углубление, запираемое при надавливании винта R, если этот винт надавить ключом на коническое отверстие. Если винт отвернуть, то воздух, заключенный в A чрез трубку G, сообщается с трубкою H, открытою в воздух. Такой способ запора при надлежащем устройстве, а именно при тщательном центрировании конического углубления и конуса запора, действует неизменно и совершенно. Неизменность зависит здесь от того, что по мере стирания конического отверстия, сделанного в медной части крана S, стальной конус запора R выдавливает себе надлежащее углубление и потому действует опять с надлежащею точностью. К выгодам такого запора относится еще и то обстоятельство, что здесь нет нужды ни в какой смазке, т. е. ни в сале, ни в спуске, как в обыкновенном кране. Мягкость меди и твердость закаленного конического конца стального запора R достаточны для герметического запора. Отводная трубка H крана S не открывается прямо в воздух, а соединяется с трубкою, содержащею хлористый кальций. Его назначение состоит в том, чтобы входящий в прибор воздух был по возможности сух. Если бы в приборе содержался влажный воздух, то с понижением температуры упругость его могла бы не следовать закону Гей-Люссака, если бы произошло образование росы. Если воздух, запертый в приборе, будет содержать малое количество водяного пара, то это нисколько не будет препятствовать точности его показаний, по той причине, что водяной пар, не насыщающий пространства, следует закону Гей-Люссака в таком же совершенстве, как и воздух.

Кроме вышеописанных существенных частей дифференциального барометра в нем есть еще одна часть, для практики полезная, хотя и не существенная. Это кран F, изображенный слева на схематическом рисунке, фиг. 1. Он устроен так же, как и кран S, и сообщается с наружною ветвью манометра CD, содержащего нефтяное масло. При помощи запора E кран этот может прекратить сообщение между воздухом и открытою ветвью манометра. При наблюдении кран этот должен быть открыт, но при переноске прибора, при его пересылке и даже при его сохранении он должен быть закрыт для того, чтобы

жидкость, заключенная в манометре CD, не подвергалась движению вследствие перемен атмосферного давления. Это особенно необходимо наблюдать в том случае, когда кран R заперт, ибо тогда, при увеличении атмосферного давления или при уменьшении температуры ванны, манометрическая жидкость поднимается во внутренней ветви и может перелиться в сосуд A; когда кран F заперт, этого очевидно случиться не может. При перенесении прибора, когда кран F заперт, прибор может быть наклонен, и манометрическая жидкость не переменяет своего места и не выливается вследствие того, что манометрическая трубка довольно узка. Для практического удобства в некоторых высотомерах, вместо пробки P, при дифференциальном термометре приспособлен также особый кран и при нем каучуковая трубка, вдувая в которую воздух, можно установить при затворе термометра положение нефти в любом месте шкалы. На концах хлорокальциевой трубки и крана F, идущих в воздух, находятся в некоторых приборах трубки, дозволяющие соединять эти концы с насосом и т. п.

После описания существенных требований прибора и способов удовлетворения им устройство различных высотомеров само собою будет понятно и потребует только небольшого разъяснения. Высотомеры, устраиваемые мною до сих пор,[1] имеют троякую форму. Первые, наиболее пригодные для точных измерений, представляют то самое устройство, какое выше описано

[1] Простейшие формы высотомеров и постоянных (*остающихся на одном* месте, напр. в физических лабораториях) дифференциальных барометров описаны в моем сочинении „Об упругости газов", т. I, гл. 5.* Упомяну здесь только о простом приборе, не снабженном дифференциальным термометром, потому что при помощи его есть возможность производить определение высот. Такие приборы могут быть главным образом полезны для демонстрации принципа изменения давлений с переменою высот, т. е. могут иметь педагогическое значение как пособие при преподавании физики. В самом деле, при производстве опытов температуру комнаты можно считать постоянною, — она в действительности изменяется сравнительно немного, — а прибор, устроенный без дифференциального термометра, отличается простотою и вследствие того более доступен по ценности. При помощи такого дифференциального барометра, возможно с большим удобством и в течение нескольких минут показать изменение давления с поднятием; стоит только, напр., запереть кран воздушного резервуара в приборе, поставив его на пол, и затем поднять прибор на высоту роста человека, чтобы изменение уровня нефтяного масла в манометре было совершенно ясно; оно при этом достигает около 2 мм и потому очевидно каждому. Поднимая затем прибор еще на бо́льшую высоту, напр. в другой этаж здания, можно заметить пропорциональность изменения уровней масла с высотою поднятия, т. е. демонстрировать основное дифференциальное уравнение, служащее для вывода гипсометрической формулы. Плотность нефтяного масла легко при этом покажет, как зависит изменение давления от плотности воздуха. Легко также при помощи такого высотомера и термометра определить меру изменения упругости воздуха от нагревания, т. е. определить коэффициент расширения воздуха.

* Сочинения, т. VI, 1939, стр. 402 — 443. (*Прим. ред.*)

было по схеме.[1] Они заключают дифференциальный термометр, имеющий форму спирали, окружающей воздушный резервуар, или форму цилиндрического сосуда, помещенного рядом с воздушным резервуаром. Этот последний сделан из латуни и помещен в цинковый сосуд, заключающий воду. В некоторых приборах этот цинковый водяной сосуд составляет внешнюю оболочку прибора. Таков, например, прибор, изображенный в фиг. 2. В других приборах этого рода боковая поверхность, дно и крышка цинкового сосуда окружены снаружи дурными проводниками тепла (залиты мастикою или окутаны бумазеею) и весь прибор помещается в деревянном ящике, на верху которого имеется три отверстия: одно для вливания воды в наружный цинковый сосуд, другое для движения мешалки, помещающейся в центре, и третье, переднее отверстие для вставления ключа, запирающего и отпирающего дифференциальный термометр. Передняя часть деревянного ящика (или передняя стенка цинкового сосуда, как в фиг. 2), закрывающаяся особенною дверцей, предохраняющей стеклянные части от случайных повреждений, служит для прикрепления следующих частей: 1) левого крана F, фиг. 2, отвечающего крану F на схеме, фиг. 1; 2) манометра CD и соответствующей ему миллиметрической шкалы; 3) стеклянной трубки дифференциального термометра N и соответствующей ей шкалы; 4) крана, идущего к воздушному резервуару и обозначенного буквою S; 5) трубки с хлористым кальцием и 6) обыкновенного ртутного термометра T, разделенного на градусы по Цельсию. В некоторых приборах сверх того на крышке прикрепляется небольшой анероидный барометр. Ртутный термометр и анероид лучше всего прикреплять не рядом с другими частями прибора, а на внутренней стороне дверцы или крышки. Этот вид высотомеров содержит все части и приборы, необходимые для производства нивелирования при разнообразных условиях, в практике встречающихся.

Вторая форма дифференциальных барометров отличается от предшествующей более простым устройством и несколько размерами. Жестяной сосуд для воды служит в этом приборе наружною оболочкой, которую при работах в поле полезно окружать дурными проводниками тепла, напр. сукном, мехом. Стеклянные части прибора, припаянные мастикою или металлическим припоем к наружной передней стенке прибора, защищаются особою жестяною крышкой при переносе. Во внутреннем устройстве и в наружном виде, фиг. 2, этот род высотомеров тем только отличается от предыдущего, что прибор весь немного меньше и дифференциальный термометр его всегда цилиндри-

[1] Фиг. 1 и 2 представляют линейные размеры прибора, уменьшенными [примерно] *в два раза*, т. е. натуральные размеры в два раза превышают размеры рисунков.

ческий, что представляет тот некоторый недостаток, что при быстрых изменениях температуры дифференциальный термометр не успевает следить за небольшими изменениями температуры, а потому с этим прибором должно производить измерения только спустя некоторое время после наступившей перемены температуры, причем необходимо действовать мешалкой, чтобы температура всего прибора уравнивалась. Резервуар дифференциального термометра в этом приборе помещается внутри водяного сосуда, в ближайшем положении к передней части прибора. Сзади его внутри помещается воздушный резервуар, и вследствие того мешалка имеет несколько эксцентрическое положение против оси всего прибора.

Третий вид из устраиваемых мною высотомеров отличается наибольшею портативностью и представляет наименьшие размеры. Весь прибор вмещается в кожаный футляр, имеющий в диаметре $2^1/_2$ вершка, а высота его около 4 вершков, а потому такой прибор, снабженный ремнем, может быть удобен при путешествии. При небольших размерах этой модели высотомеров получается прибор, сравнительно легко меняющий свою температуру, но зато в нем и легко можно регулировать температуру искусственными способами; так, например, если при работе в поле прибор охладится более того, сколько желательно, то достаточно подержать его несколько времени в руках, чтобы температура прибора повысилась до желаемой меры. Если же температура прибора возвысится более, чем желательно (напр. более, чем может показывать дифференциальный термометр), то достаточно несколько раз обтереть его снаружи мокрым платком, чтобы наступило охлаждение. В этом приборе воздушный резервуар имеет форму цилиндрическую, и прибор не снабжен мешалкой. Эта последняя здесь мало приносит пользы вследствие небольших размеров прибора, затем вследствие того, что массивные медные стенки прибора и без того хорошо уравнивают температуру и, в-третьих, потому что этот прибор назначается для переносок, во время которых вода в приборе и без того взбалтывается. В приборах этой модели для удобства размеров устранена трубка с хлористым кальцием, но все другие части те же, как и в полном приборе. В приборах этого рода термометрический резервуар представляет форму спирально изогнутой трубки.

Применение гипсометрической формулы к определению высот с помощью высотомера

Так как куб. метр нефтяного масла, употребляемого в высотомерах, имеет вес около 850 кг, т. е. в 16 раз легче ртути, и так как манометр наибольших устраиваемых приборов пока-

зывает разность высот уровней нефти не более как в 200 мм, то разность давлений, определяемая высотомерами, не превышает 12 мм ртутного столба; а как каждый миллиметр ртути отвечает примерно 11 м поднятия, то при помощи обыкновенных высотомеров определяются разности высот не более, как в 100—130 м. Если же представляются большие высоты, то нужно избирать несколько промежуточных станций, на которые искомая высота разделяется. Для практического употребления высотомеров поэтому нет никакой нужды в полной гипсометрической формуле; совершенно достаточно первое приближение (подобное формуле Бабине) к точной гипсометрической формуле,[1] а именно:

$$z = 7990\,\frac{H_0 - H_1}{{}^1/_2\,(H_0 + H_1)}\left(1 + k\,\frac{T_0 + T_1}{2}\right)[f] \quad \ldots \text{(XXI)}^2$$

Напомним, что H_0 и H_1 суть барометрические давления, h_1 и h_0 — упругости водяного пара для двух станций наблюдения, выраженные в любых единицах (напр. в миллиметрах или дюймах ртутного столба, или в килограммах на метр), а T_0 и T_1 — температуры воздуха по 100° термометру на тех же местах наблюдения; $k = 0.00368$, а z есть разность высот в метрах *того места, где давление* H_1, *над тем, где оно* $= H_0$.

Множители полной гипсометрической формулы (VIII, X), содержащие изменение высот, зависящее от перемены напряжения тяжести, так малы, что ими положительно можно пренебречь. В самом деле, если на экваторе определить по разности давлений разность высоты в 100 м, то на полюсе, где напряжение тяжести наиболее отличается от экваториального, те же данные дадут высоту 100.5 м. Поэтому, если постоянную величину гипсометрической формулы взять такую, которая относится до

---

[1] Когда $z = 100$ м, то $\lg \frac{H_0}{H_1}$, входящий в полную гипсометрическую формулу (VIII), близок 0.01250, а заменяя его величиною $\frac{H_0 - H_1}{{}^1/_2\,(H_0 + H_1)}$, делаем погрешность, меньшую, чем ${}^1/_3\,(0.0125)^3$ или около 0.0000066, которая отвечает высоте 0.0048 м, т. е. такой, которая на нефтяном манометре выразится разностью уровней, меньшею $\frac{1}{100}$ мм, а такие величины наблюдать с уверенностью нельзя. Поэтому, применяя неполную гипсометрическую формулу к высотомерам, мы не делаем никакой сколько-нибудь ощутительной погрешности (см. формулу E).

[2] Через букву $[f]$ мы означаем здесь функцию влажности

$$f = \left[1 + 0.377\,\frac{1}{2}\left(\frac{h_0}{H_0} + \frac{h_1}{H_1}\right)\right],$$

которую в формуле (XI) означили через $\varphi(h)$. Она близка к единице. Ее логарифмы даны в таблице *C*, стр. 82.

средних широт, то поправка от перемены географической широты будет ничтожно мала. В предшествующей формуле постоянный член формулы 7990 и взят для широты средней для России, а именно для широты около 50°.

Переменные величины, входящие в эту формулу, могут быть разделены по отношению к точности результата совершенно ясно на две категории: к первой из них относится переменная величина разности давлений $H_0 - H_1$. Эта величина должна быть определена с возможною точностью, потому что она определяет главным образом значение высоты z, так как меняется почти пропорционально изменению высот. Эта разность давлений $H_0 - H_1$ должна быть выражена в тех же единицах, как и полусумма давлений $\frac{1}{2}(H_0 + H_1)$. А как последняя определяется или ртутным барометром, или анероидом, деленным на миллиметры ртутного давления, то, выражая среднее давление в миллиметрах ртутного столба, должно и разность давлений выразить в миллиметрах ртутного столба, а потом применять формулу (XXI).[1] Из сказанного выше (стр. 125) ясно, что величина H среднего давления может быть определена с меньшею точностью, чем величина разности давления.

Другие переменные величины, кроме $H_0 - H_1$, входящие в предшествующую формулу (XXI), или относительно мало меняются, или имеют вообще малое значение, а потому оказывают малое влияние на точность результата z. В самом деле, полусумма барометрических давлений $\frac{1}{2}(H_0 + H_1)$, или среднее давление H, как выше было доказано, может представить погрешность сравнительно значительную, а результат мало будет страдать в точности. Поэтому, пользуясь высотомером для точного определения $H_0 - H_1$, можно величину $H = {}^1/_2(H_0 + H_1)$ определять сравнительно грубо, по анероиду, который для этой цели должен составлять принадлежность высотомера.

---

[1] По существу дела совершенно очевидно, что в гипсометрической формуле совершенно безразлично, в каких единицах ни выражать давление, потому что в дело входит частное от давлений. Избирая для выражения давлений грамм на кв. сантиметр, мы можем упростить все дальнейшие рассуждения, потому что в числителе гипсометрической формулы входит разность давлений, определяемая в дифференциальных барометрах высотою нефтяного столба, выраженного миллиметрами, а в знаменателе входит все атмосферное давление, определяемое высотою ртутного столба. Чтобы получить результат, очевидно необходимо оба рода выражения привести к одному. В статье о дифференциальных барометрах, помещенной в моем сочинении „Об упругости газов", дело и сведено на давления в граммах на кв. сантиметр. Там вывод формулы, применимой к дифференциальному барометру, сделан независимым от гипсометрической формулы, а здесь я его свожу на эту последнюю формулу. Результат, конечно, тот же, хотя приемы и различны.

Значение температурных различий T_0 и T_1 (определяющих температуру наружного воздуха) в гипсометрической формуле (XXI) еще менее, чем целого барометрического давления, потому что на небольшом расстоянии мест нивелирования температура вообще меняется мало. Представим, например, что в определении средней температуры воздуха $\frac{T_0+T_1}{2}$, мы делаем погрешность, достигающую даже до 1°. При такой грубой погрешности на 100 м высоты вся погрешность, от того происходящая, не будет превышать 4 дм (см. (XVIII), $x=zkt$ = в примере: 100·0.0036). Влияние члена, заключающего упругость пара, еще того менее; и так как определение влажности в каждом месте наблюдения представило бы значительные усложнения при обыкновенном нивелировании, то можно принять влажность воздуха сообразно общим атмосферным условиям. Так, во время очень влажной погоды можно допустить содержание в воздухе около 90% влажности, при самой сухой погоде, в теплое время дня, особенно летом, можно допустить содержание в воздухе редко менее 30% влажности. А потому в таблицах, приложенных к этой статье, приведено значение коэффициента формулы сообразно содержанию влажности в 30 и 90%. Приняв одно из промежуточных значений, сделаем, как видно из таблиц, небольшую погрешность.

На основании вышеизложенного гипсометрической формуле (XXI), назначаемой для высотомеров, пользуясь формулою (XX) и замечая, что значения H и T в обеих формулах одни и те же и что $k=0.00363$ (стр. 130), можно придать вид:

$$\left.\begin{array}{l} z=-R\left(s+H6798\,\frac{v}{V}\right)h-29.00\,(T_2-T_1), \\ \text{где } R=\frac{7990\,(1+kT)\,[f]}{13596\,HR}. \end{array}\right\} \quad \text{(XXII)}$$

Замечу для ясности, что в формуле (XX) входят H_2-H_1) а в формуле (XXI) значения H_0-H_1, а потому во 2-й части (XXII, стоят знаки — (минус) при h и T_2-T_1. Это показывает, что когда в наружной ветви нефть опустится (h положительно), высота z будет отрицательна, т. е. произойдет уменьшение высоты—опускание, которое и влечет за собою увеличение давления, что и показывается положительным значением h. Чтобы избегнуть этого отрицательного знака, могущего легко повести к недоразумению и ошибке расчета при нивелировке, должно считать h положительным тогда, когда давление убывает, что и достигается весьма простым приемом отчета и записи показаний манометра, далее объясняемым. Отрицательный знак при температурном члене показывает, что при возрастании температуры на 1° (когда для прибора $T_2-T_1=1$) получается такое показание

прибора, которое отвечает опусканию на 29.00 м, хотя бы z было=0. Это так, потому что от повышения температуры прибора упругость воздуха в приборе возрастает, следовательно значение h будет отрицательное, а ему отвечает положительное значение z. Из величины 29.00 (которая $= 7990 \cdot 0.00363$) очевидно, что температурную разность прибора должно определять с точностью $\frac{1}{100}$ градуса, если от нее не хотим иметь в высотах z погрешности более чем в $\frac{1}{3}$ м или около фута. Такая степень точности легко достижима в устраиваемых мною дифференциальных термометрах, потому что в них 30—50 мм шкалы отвечают 1°, а потому $\frac{1}{100}$ градуса ясно видна. Если $s=850$, то, так как R близко к 0.0008, а член с $\frac{v}{V}$ близок к 0, каждому миллиметру нефти в манометре отвечает высота $z=0.7$ м, а потому, делая отчет по манометру только с точностью $\frac{1}{4}$ мм, мы получим в z погрешность не более 0.2 м. Поэтому (XXII) показывает, что высотомер может легко, при грубом отчете, показывать разность высот в $\frac{1}{3}$ м и менее того.

В (XXII) формуле R определяется средним давлением (по анероиду, наблюденному в A и B), среднею температурой, наблюденною на ртутном термометре, находящемся при высотомере (T, фиг. 2), и средним содержанием влажности, определяемым погодою.

Если чрез Δ означим вес куб. сантиметра нефти в граммах, то $\Delta = \frac{s}{1000}$. Если сверх того заметим, что $\frac{v}{V}$ постоянно для прибора, как и s, и что значение члена $H\,6798\,\frac{v}{V}$ мало меняется при обычных изменениях давлений, то получаем окончательную формулу для высотомеров (припомним притом, что $z = z_1 - z_0$):

$$z = z_1 - z_0 = QK(-h) + 29.00\,(-t), \quad \ldots \quad \text{(XXIII)}$$

где $Q = \frac{7990\,(1+kT)\,f}{13.596\,H}$ — Изменяется с переменою температуры, упругости и влажности атмосферы.

$K = \Delta + H\,6.8\,\frac{v}{V}$ — Изменяется с переменою плотности нефти и от одного прибора к другому.

h — Разность уровней нефти в манометре в мм, считая от открытого конца.

$t = T_2 - T_1$ — Разность температуры прибора в градусах Цельсия в A и B по дифференциальному термометру.

В конце статьи приведены таблицы, дающие значения Q при обыкновенных, в практике встречающихся давлениях, температурах и содержаниях влажности. Далее мы будем рассматривать преимущественно значение величины множителя $(-h)$, как главной переменной, определяющей высоту, ибо коэффициент K, как видно из его определения (XXIII), меняется при самых разнообразных экстремах давления сравнительно весьма немного и зависит преимущественно от Δ.

Что касается до переменной Δ, то она представляет вес в граммах одного куб. сантиметра нефтяного масла (или плотность, считая воду при 4° за 1, при взвешивании в воздухе. См. Об упругости газов, стр. 279, выноска).

Плотность нефтяного масла есть величина, которая должна быть предварительно определена отдельно для каждого дифференциального барометра. Если плотность нефтяного масла при температуре 0° назовем Δ_0, то в формулу должно подставить частное из Δ_0 на изменение объема нефти от 0° до температуры наблюдения T, т. е. должно взять Δ, отвечающую температуре наблюдения, следовательно:

$$\Delta = \frac{\Delta_0}{1+bT} \text{ или } = \Delta_0 - cT.$$

В этой формуле b означает коэффициент кубического расширения нефтяного масла, а c — коэффициент изменения плотности нефти. Судя по исследованиям, сделанным мною над разными сортами нефтяного масла, представляющими высокие температуры кипения, оказывается, что коэффициент кубического расширения этого масла очень мало изменяется с природою вещества, а именно приблизительно равняется 0.0008. Поэтому исследователю нет нужды определять коэффициент расширения нефтяного масла; достаточно знать его плотность при 0° или, еще лучше, при одной из температур, близких к обыкновенным в наблюдении. Определение плотности нефтяного масла легко произвести в собранном приборе пользуясь законом равновесия жидкостей, по которому высоты столбов жидкостей, выражающие разность давлений, обратно пропорциональны плотностям жидкостей. Поэтому, если некоторую разность давлений определить одновременно высотою столба воды и высотою столба нефтяного масла, то отношение этих высот даст отношение плотностей нефти к воде, а как плотность воды при данной температуре известна,[1] то

---

[1] При 0° = 0.99987, при 4° = 1, при 5° = 0.99999, при 10° = 0.99973, при 15° = 0.99915, при 20° = 0.99899, при 25° = 0.99714, при 30° = 0.99577. См. „Об упругости газов", т. I, 28.*

* Сочинения, т. VI, 1939, стр. 318. (*Прим. ред.*)

поэтому можно узнать из наблюдения плотность нефтяного масла. Чтобы произвести такого рода определение, должно иметь манометр с водою и при нем миллиметрическую шкалу такого же рода, как и при нефтяном манометре. Такой водяной манометр при полных приборах должен находиться и может быть присоединяем к тому крану прибора (*E*, фиг. 1), которым кончается открытая ветвь нефтяного манометра. Водяной манометр должно взять возможно широкий, для того чтобы капиллярная погрешность, происходящая от некоторого неравенства диаметров манометрической трубки, была возможно мала. Та ветвь водяного манометра, которая соединяется с нефтяным манометром, должна быть снабжена особою боковою трубкой, кончающеюся каучуковою трубкой с зажимом. Должно устроить притом, чтобы эта ветвь водяного манометра была герметически соединена с краном нефтяного манометра. Для этой последней цели к концу водяного манометра пригоняется плотная пробка такого размера, чтобы она могла входить в отверстие крана (*E*, фиг. 1) нефтяного манометра. Зажимающий винт этого крана с этою целью вывертывается и на место него ставится с мастикою или воском вышеназванная пробка. Когда пробка вставлена в кран, тогда также с мастикою или воском вставляется в отверстие пробки конец водяного манометра. При этом должно стараться поместить водяной манометр так же вертикально, как и нефтяной. Когда соединение обоих манометров сделано, тогда должно герметически закрыть боковое отверстие манометрического крана *F*,[1] это достигается при помощи воска или мастики. Затем необходимо испытать герметичность соединения обоих манометров, а потому должно открыть правый кран прибора *S*, фиг. 1, вытянуть при помощи каучуковой трубки часть воздуха из пространства между двумя манометрами и запереть зажим, надетый на каучуковой трубке. Спустя некоторое время должно наблюсти положение нефти в манометре. Если температура осталась постоянною, то уровень нефти не упадает, если соединение сделано герметично. Если же и будет происходить очень медленное изменение уровня, то оно не будет иметь влияния на результат определения плотности, потому что это последнее — дело нескольких секунд. Когда достигнуто возможно герметическое соединение, тогда должно открыть зажим на каучуке, сделать отчет положения воды и нефти в обоих манометрах, вытянуть часть воздуха при помощи каучуковой трубки, запереть зажим и снова сделать отчет уровней на обоих манометрах. Назовем чрез b_1 высоту поднятого столба воды, а через b — высоту поднятого столба

[1] У крана *F*, фиг. 1, есть боковое отверстие, идущее в воздух. При нем иногда припаивается особая металлическая трубка и тогда сообщение с водяным манометром легко достигается этою трубкой.

нефти; плотность воды Δ_1 относится к плотности нефти Δ так, как $b:b_1$, следовательно:

$$\Delta = \Delta_1 \frac{b_1}{b}.$$

При этом должно наблюсти температуру, которую имеют вода и нефть. По этой температуре можно найти плотность воды, а по температуре нефти T, зная коэффициент ее расширения 0.0008, найдем Δ_0, потому что $\Delta = \Delta_0(1+0.0008\,T)$. Следовательно:

$$\Delta_0 = \frac{\Delta_1}{1+0.0008\,T} \cdot \frac{b_1}{b}.$$

Точность такого определения плотности нефти совершенно удовлетворяет задачам исследования, потому что опыт может быть продолжен и повторен, и следовательно легко получить несомненное число с большею точностью, чем нужно для применения к определению высот. (В предшествующем определении необходимо принять во внимание капиллярность воды и плотность воздуха, но я не останавливаюсь над этими подробностями, не желая удлинять изложение подробностей).

Продолжая далее разбор величин, входящих в (XXIII), остановимся теперь на разности давлений ($-h$), выраженной в миллиметрах столбом нефти в манометре. Эта разность может быть или положительною, или отрицательною. На это обстоятельство должно обратить большое внимание, применяя высотомер к практике, потому что при нивелировании встречаются и понижения, и повышения. Расположение записей и расчет величин h должны быть устроены так, чтобы в этом отношении не было никаких недоразумений и возможности погрешности. Для этой последней цели в устраиваемых мною высотомерах для отчета высот нефти на манометре употреблен способ, устраняющий всякую возможность погрешности, а именно: миллиметрическая шкала манометра снабжена следующего рода надписями: на открытой ветви F манометра (CD, фиг. 1) находится наименьшее число, напр. 0; спускаясь по этой стороне манометра, надписи возрастают до 200 мм, так как высота манометра около 200 мм. Затем цифры, написанные на манометрической шкале при другой (т. е. закрытой или обращенной к воздушному сосуду) ветви манометра, возрастают снизу вверх, начиная от 200 до 400 мм. При этом устройстве надписей шкалы приходится каждый раз читать положение нефти в обеих ветвях манометра на одной и той же шкале с двух сторон. Цифры, идущие от 0 до 200, будут выражать положение нефти в открытой ветви манометра, а цифры, идущие от 200 до 400, выразят положение уровня нефти в закрытой ветви манометра. Если оба крана, F и S,

фиг. 1, прибора открыты, то при всякой температуре воздуха и нефти высота ее в обеих ветвях будет одна и та же, а следовательно сумма записей высот будет всегда равна 400. Если нефть наполняет ровно половину манометра, то в открытой ветви она будет стоять на высоте 100 мм, а в закрытой на высоте 300 мм. Если нефть расширится от нагревания, то в открытой ветви, напр., она будет на высоте 99.3 мм, а в закрытой ветви она будет тогда стоять на высоте 300.7; сумма все-таки будет 400. Вследствие этого, когда краны открыты (в первом месте наблюдения A), нет нужды в записывании отчета высот. Когда после закрытия правого крана S и перехода на новое место B наблюдения делается отчет, то получится напр. некоторая высота m в открытой части манометра и n в закрытой части его. Если атмосферное *давление уменьшилось*, т. е. z есть величина положительная, тогда в открытой ветви манометра нефть поднимется, а в закрытой опустится, а потому *сумма* $m+n$ *будет менее* 400; вычитая при этом из $m+n$, т. е. из суммы отчета на манометре на станции B, величину 400, т. е. сумму отчетов в первой станции A, получим отрицательную величину, — она отвечает уменьшению давления, а поступая обратно, т. е. вычитая из 400 сумму $m+n$, получим положительную величину, соответствующую положительной разности высот, т. е. поднятию. Разность $400-(m+n)$ будет поэтому с таким знаком, который имеет высота z. Так, например, если произошло опускание почвы при переходе из A в B, то сумма отчетов $m+n$ будет больше 400, потому что атмосферное давление тогда увеличится; а по этой причине в открытой ветви нефть будет стоять ниже, а в закрытой выше, чем при открытом кране. Таким образом, практически необходимо соблюдать следующее правило: для определения разностей уровней нефти ($-h$) в формуле (XXIII) должно *из 400 вычитать сумму отчетов, наблюденных на обеих ветвях манометра*. В журнал наблюдений следовательно нет нужды записывать, увеличилось или уменьшилось давление, произошло ли поднятие или опускание; должно записывать только видимые величины m и n отчетов на закрытой и открытой ветвях манометра, причем нет нужды обращать внимание на то, относится ли данное число к закрытой или открытой ветви манометра; должно только читать положение уровней нефти и затем получить сумму этих отчетов. Она прямо покажет разность давлений со знаком, соответствующим изменению высоты. Упомянутое практическое правило имеет еще и ту выгоду, что относится вполне и к отчету на шкале дифференциального термометра. Если бы отчеты были градусы, то $t=T_1-T_0$ или T_2-T_1, следовательно ($-t$), входящее в (XXIII), $=T_1-T_2$, следовательно подпись (как в манометре) или отчет T_2, сделанный на второй станции, должно вычитать из T_1 — отчета, сделанного на первой станции. Притом на шкале термометра нанесены цифры (снизу

вверх) от 400 до 600 и деления суть миллиметры,[1] а потому в записи нет надобности указывать, что данное число относится к термометру, а не к манометру, ибо одни и те же числа на их шкалах не встречаются. Пусть, например, на станции A записано число 520.3, на станции B—числа 170.8, 378.7 и 561.7. Это будет значить, что на первой станции (после запора крана K) стояние термометра было на 520.3 мм, на второй станции 561.7, следовательно величина $(-t)$, входящая в (XXIII), будет выражаться разностью 520.3—561.7, умноженною на величину q, которая показывает значение одного миллиметра данного дифференциального термометра в градусах Цельсия. Если отчеты дифференциального термометра на первой и второй станциях означим через t_1 и t_2, то

$$(-t) = q(t_1 - t_2).$$

Точно так же, если отчеты на манометре на первой станции суть m_1 и n_1, а на второй m_2 и n_2, то:

$$(-h) = (m_1 + n_1) - (m_2 + n_2).$$

Так как $m_1 + n_1$ всегда $= 400$, то:

$$(-h) = 400 - (m_2 + n_2).$$

Такой способ записи и расчета не может представить никакой описки, потому что числа, полученные на первой станции, записываются очевидно раньше, чем соответственные числа второй станции, и как они стоят одно над другим в последовательной записи, так их должно вычитать:

$$\text{Запись} \begin{cases} \text{в } A & 400 & t_1 \\ \text{в } B & m_2 + n_2 & t_2. \end{cases}$$

Разность и есть искомое, которое должно подставить в гипсометрическую формулу. Она (XXIII) после того приобретает вид:

$$z = QK[400) - (m_2 + n_2)] + 29.0\, q(t_1 - t_2). \quad . \quad . \quad \text{(XXIIII)}$$

где Q найдется по таблицам, прилагаемым в конце статьи. K есть величина, изменчивая от одного прибора до другого (ее значение мы далее рассматриваем), m_2 и n_2 суть отчеты, сделанные по манометру на второй станции наблюдения. B, q есть значение в градусах Цельсия 1-го миллиметрического деления на шкале дифференциального термометра (о способе его определения речь далее), t_1 — отчет по этой шкале, сделанный при закрытии крана на первой станции, t_2 — такой же отчет на дифференциальном термометре на второй станции.

---

[1] Что сделано ради того, чтобы наблюдатель приучил глаз к отчету подразделений меры одного рода — миллиметрической.

Устройство высотомера позволяет находить K и q с легкостью (и скоро) после того, когда прибор составлен, и даже после того, когда сделаны с ним все определения. Величины эти можно определять легко и эти определения повторять сколько угодно раз без помощи новых точных мерительных средств, что мы и изложим вслед за сим. Обратив внимание на K (XXIII), мы видим, судя по вышесказанному, что

$$K = \frac{\Delta_0}{1 + 0.0008\, T_2} + H_1 6.8\, \frac{v}{V}.$$

Выше мы описали способ определения Δ_0, а значение члена, содержащего неизвестную $\frac{v}{V}$, должно стараться сделать как можно меньшим, и тогда даже грубая погрешность в определении отношения $\frac{v}{V}$ будет иметь весьма мало влияния на результат. Однако эту величину можно определить с точностью весьма большою. Припомним, что v есть емкость одного миллиметра деления манометра, а V — емкость всего воздушного резервуара.

Для определения отношения емкости одного деления манометра к емкости воздушного резервуара, т. е. величины $\frac{v}{V}$, практичнее всего[1] поступать следующим образом: сперва должно открыть правый S и левый F краны прибора и трубку с хлористым кальцием, сообщающуюся с правым краном, соединить с каучуковою трубкой. Для этой последней цели конец трубки с хлористым кальцием должен снабжаться тонкою стеклянною трубкой, на которую легко и плотно надевается подходящая каучуковая трубка. Чрез эту трубку легко вдуть в прибор некоторое количество воздуха. Легкое вдувание должно производить до тех пор, пока уровень нефти в наружной ветви манометра не поднимается до одного из самых верхних делений (напр. до 20), и в это время левый кран F должно запереть. Тогда должно произвести перемешивание воды прибора мешалкой и сделать отчет положения нефти во внутренней ветви. Назовем через n то деление, на котором остановилась нефть во внутренней ветви, обращенной к воздушному резервуару. Тогда запирается правый кран прибора, а левый открывается. При этом уровень нефти в наружной ветви упадет, а во внутренней поднимется; но уровни нефти не будут одинаковы в обоих ветвях: в наружной ветви нефть будет стоять выше, чем во

[1] В сочинении „Об упругости газов", т. I, стр. 134* дан другой способ. Описываемый здесь короче, точнее и не сопряжен с определением Δ, которую можно узнать отдельно или взяв нефтяное масло определенной плотности. На доставляемых мною приборах Δ дана.

* Сочинения, т. VI, 1939, стр. 416. (*Прим. ред.*)

внутренней, и разность высот ($=400-m_1-n_1$, где n_1 и m_1 суть отчеты, теперь сделанные на манометре) назовем через d, а положение уровня нефти во внутренней ветви обозначим чрез n_1. Этих величин совершенно достаточно для определения вышеуказанного отношения объемов. Все эти отчеты можно вести так быстро, что ни наружное давление, ни температура ванны заметным образом за это время не изменятся. При этом должно знать атмосферное давление, наблюденное на барометре; назовем его через P и представим, что оно выражено в миллиметрах ртутного столба. Умножив P на 13.596 и разделив на Δ, т. е. умножив на отношение плотностей ртути и нефти (приблизительно оно равно 16), знаем величину атмосферного давления, выраженного столбом нефти в миллиметрах. Через V означен объем воздушного резервуара + объем воздуха в манометре до того места n_0, на котором останавливается нефть при открытых кранах (т. е. примерно до 300 деления шкалы).

Когда правый кран был запираем, объем воздуха, запертого в резервуаре, был равен $V+(n_0-n)v$, где n_0 есть положение нефти в закрытой ветви манометра при открытых кранах. Давление, под которым был тогда воздух резервуара, выражается столбом нефти $\frac{P\,13.596}{\Delta}$. Когда правый кран закрыт и левый кран открыт, объем, занятый воздухом, будет $V+(n_0-n_1)v$, а давление, под которым находится теперь запертый воздух, будет $P\frac{13.596}{\Delta}+d$. Произведение из объемов на давление для газов, по мариоттову закону, постоянно, следовательно, получим уравнение:

$$[V+(n_0-n)v]\frac{P\,13.596}{\Delta}=[V+(n_0-n_1)v]\times\left[P\frac{13.596}{\Delta}+d\right],$$

откуда находим, приняв во внимание, что $\frac{P\,13.596}{\Delta}$ гораздо более d:[1]

$$\frac{v}{V}=\frac{\Delta}{P\,13.596}\,\frac{d}{n_1-n}\quad\ldots\ldots\ldots\quad(XXV)$$

Таким образом, в течение весьма короткого времени и без помощи других приборов, на самом высотомере, величина $\frac{v}{V}$ легко находится для каждого прибора. Для ясности приводится пример определения отношения $\frac{v}{V}$ для одного из дифференциальных барометров обычного размера.

Предварительное наблюдение дало:

$$n_0=304.1;\quad P=739.6;\quad \Delta=0.8471;$$

[1] d = нескольким миллиметрам, $\frac{P\,13.596}{\Delta}$ около 12 000 мм.

отчеты при опыте были:

$$n = 219.3; \quad n_1 = 295.9; \quad m_1 = 96.6;$$

отсюда:

$$d = 7.5; \quad \frac{v}{V} = 0.0000082.^1$$

При столь малой величине множителя $\frac{v}{V}$, значения K, в пределах погрешности наблюдения, почти не зависят от перемены H. Действительно, заменив $H = 780$ величиною $H = 750$, даже при $\Delta = 0.85$, погрешность в z не более как в 0.2 м, а потому величина $H\,6.8\,\frac{v}{V}$ для данного нивелирования с определенным прибором, когда местность довольно ровна и H близко к постоянству, может быть считаема за постоянную. Например, если с тем прибором, для которого дано выше $\frac{v}{V}$, сделано нивелирование и H менялось от 720 до 740, то $K = \Delta + 0.0409$.

Для определения того значения, которое имеет q, т. е. одно деление дифференциального термометра в градусах Цельсия, достаточно также весьма непродолжительного времени и не требуется особого точного термометра, потому что самый *высотомер представляет собою воздушный термометр*, служащий, как известно, исходом в определениях температур. Определение q можно производить $\left(\text{как и } \frac{v}{V}\right)$ различными способами; способ, описываемый вслед за сим, по опыту оказался наилучшим из испытанных мною. Дадим прибору принять температуру окружающего воздуха; в этом легко убедиться, запирая по временам краны K и R, фиг. 1, воздушного резервуара и термометра. Если температура уравнялась, то уровни нефти в термометре и манометре не будут изменяться; если она повышается или понижается, то будут происходить изменения уровней в манометре и термометре. При этом испытании полезно окружить прибор возможно дурными проводниками тепла (ватою, мехом, шерстью) и стараться, чтобы приближение наблюдателя как можно менее изменяло температуру. Когда уравнение температуры произошло (при открытом кране R воздушного резервуара), должно наблюсти: 1) на барометре атмосферное давление P, выраженное столбом ртути в миллиметрах. Судя по предыдущему, $\frac{P\,13.596}{\Delta}$ выразит давление столбом нефти; 2) температуру по ртутному термометру, находящемуся при каждом приборе T, фиг. 2. Эту тем-

[1] Если считать, что манометрическая трубка имела диаметр в 2 мм, то это число показывает, что емкость воздушного резервуара около 367 куб. см.

пературу назовем T, как и выше. Достаточно для большей точности q, если T будет известно с точностью $\frac{1^\circ}{10}$ Ц., что и дает прямое отсчитывание. Этой точности достаточно, потому что величина T входит в определении q только в виде двучлена $1+0.00363\,T$, а потому оказывает малое влияние на результат. Запрем тогда кран R прибора, фиг. 1, и кран K дифференциального термометра, и заметим (на шкале N, фиг. 1) то положение t_0 (число будет от 400 до 600, см. выше), при котором стоит уровень нефти в капиллярной трубке дифференциального термометра. Выше было объяснено, что при помощи пробки P, фиг. 1, закрывающей наружное отверстие капиллярной трубки дифференциального термометра, есть возможность поставить положение верхней части нефти в термометрической трубке или высоко, или низко. Если предполагается нагревать прибор (а это и практичнее всего делать) для определения q, то должно поставить уровень нефти в дифференциальном термометре в самое низкое положение. Сделав все вышеописанное, должно подвергнуть весь прибор, при постоянном действии мешалки, слабому нагреванию. Для этой последней цели достаточно перенести прибор в близость к печке или просто подержать его над свечею или лампою, или влить в его ванну небольшое количество теплой воды. Во всяком случае, нагревание должно вести очень осторожно для того, чтобы не возвысить температуру более надлежащего, сколько могут показать манометр и термометр. Но притом это возвышение должно произвести как можно быстрее, чтобы в это время с атмосферным давлением не произошло перемены.[1] При повышении температуры единовременно будут повышаться столб нефти в наружной ветви манометра и столб нефти в термометре. Когда повышение достигнуто (нагревание должно прекратить, опять прибор одеть худыми проводниками тепла и мешалку двигать) и некоторая равномерная температура получена, т. е. когда возвышение обоих столбов нефти прекратится, должно сделать отчет на манометре и на трубке дифференциального термометра. Назовем положение нефти, наблюденное на дифференциальном термометре, через t_1 и пусть отчеты на манометре будут m и n. Сумма их будет очевидно менее 400. Разность $400-m-n$ назовем чрез d. На основании этих величин определим значение одного деления дифференциального термометра, потому что составится следующее уравнение, основанное на совокупности законов Мариотта и Гей-Люссака, ибо масса

---

[1] Выливая сифоном часть воды и прибавляя на место нее теплой воды, можно скоро и легко этого достигнуть. А имея второй высотомер, можно узнать по нем, не произошло ли во время опыта перемены давления, и если произошло, то сколько, и на это исправить показание прибора.

воздуха, запертого в воздушном резервуаре, во время опыта осталась неизменною:[1]

$$\frac{VP\frac{13.596}{\Delta}}{1+0.00363\,T}=\frac{\left(V+\frac{d}{2}v\right)\left(P\frac{13.596}{\Delta}+d\right)}{1+0.00363\,(T+x)}.$$

В этой формуле через x названо то неизвестное изменение в температуре, которое произошло в предшествующем опыте, выраженное в градусах термометра Цельсия. Из предшествующего уравнения определим, пользуясь обычными приемами, значение x, а именно, сперва имеем:

$$1+\frac{kx}{1+kT}=\left(1+\frac{dv}{2V}\right)\left(1+\frac{d\Delta}{P\,13.596}\right),$$

где $k=0.00363$.

Отсюда, пренебрегая малою величиной, заключающею

$$d^2\,\frac{v}{2V}\,\frac{\Delta}{P\,13.596},^2$$

получаем

$$x=d\left(\frac{1}{2}\,\frac{v}{V}+\frac{\Delta}{P\,13.596}\right)\left(\frac{1}{k}+T\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad \text{(XXVI)}$$

В то же время изменение температуры равно перемещению (t_1-t_0), происшедшему в дифференциальном термометре, следовательно $x=q(t_1-t_0)$, и каждое деление дифференциального термометра отвечает изменению в градусах, равному $\bar{q}=\frac{x}{t_1-t_0}$. Теперь, если в дальнейших определениях потребуется выразить, на основании наблюденного перемещения, замеченного в дифференциальном термометре, приращение температуры, то стоит определить только перемену уровня в дифференциальном термометре и помножить эту величину на найденное предшествующим образом значение q одного деления дифференциального термометра в градусах. При этом должно заметить, что практически весьма выгодно придать термометрической трубке такой диаметр, чтобы одно деление дифференциального термометра отвечало примерно $^1/_{40}$ градуса Цельсия, т. е. чтобы 40 делений термометра отвечали 1° Ц., потому что при изменении температуры на 1° уровень нефти в манометре претерпевает изменение около 40 мм. При таком устройстве дифференциального термометра

---

[1] За коэффициент расширения воздуха принято число, выражающее разность между истинным числом 0.003684 и коэффициентом расширения сосуда 0.000054 (см. выше) $= 0.00363 = k$; $\frac{1}{k}=276$.

[2] Очевидно, что x определяется и без этого допущения, но если d менее 100 (x менее 2.5°), то ею вполне возможно пренебрегать.

чувствительность его будет отвечать чувствительности манометра, т. е. при постоянном давлении и при перемене температуры изменение уровня нефти в манометре и термометре будет выражаться одними или примерно одними и теми же величинами.

Практически также важно, чтобы трубка дифференциального термометра представляла возможную цилиндричность. Впрочем, легко достигнуть в самом приборе калибрования трубки, если вышеприведенным способом определить соответствие одного деления трубки с градусами Цельсия в различных ее частях, например произведя 2 определения между теми же пределами температур, сперва от самой нижней части термометрической трубки до ее средины, а затем от средины до ее верху. Если трубка цилиндрична, то в пределах погрешностей опыта получаются одни и те же значения для ее делений; если же цилиндричность далеко не удовлетворительна, то будет различие, зависящее от коничности трубки.

Для уяснения привожу пример определения, сделанного с тем же прибором, который упомянут был после формулы (XXV).

$$t_0 = 427.2; \quad t_1 = 493.5; \quad P = 740.1; \quad m + n = 451.8;$$

$$\Delta = 0.8476; \quad \frac{v}{V} = 0.0000082; \quad T = 18.°3.$$

Отсюда $d = 51.8$; $x = 1.334$; $q = 0.02012$.

В другом опыте, сделанном в той же части трубки, получилось $q = 0.02018$, а когда $t_0 = 501.3$, $t_1 = 562.7$, тогда значение q было $= 0.02027$. Различия этих чисел очень малы, а потому принято среднее $q = 0.0202$, а потому одному градусу Цельсия отвечает здесь 49.5 мм на дифференциальном термометре.

Совокупляя в одно целое все сказанное выше об определении высот дифференциальным барометром, мы получаем следующую формулу, выражающую высоты в метрах, по наблюдениям, сделанным с дифференциальным барометром:

$$\left.\begin{aligned} z &= QK(400 - m_2 - n_2) + 29.0\, q\,(t_1 - t_2). \\ Q &= 587.7\, \frac{1 + 0.00367\, T}{H}\, f. \\ f &= 1 + 0.377 \frac{h}{H}. \\ K &= \frac{\Delta_0}{1 + 0.0008\, T_2} + H 6.8 \frac{v}{V}. \end{aligned}\right\} \quad \ldots \text{(XXVII)}$$

Величина t_1 отмечается на станции A, где закрываются краны K и S, фиг. 1 и фиг. 2; на станции B отмечаются m_2, n_2, t_2 и T_2. Давление H есть среднее (по выверенному анероиду, приведено к 0°) из наблюденных в A и B. Температура T и упругость пара h суть средние, наблюденные в A и B. Значения Q для

разных встречающихся в практике условий погоды даны в таблицах, помещенных в конце статьи. Величины Δ_0, q (по XXVI) и $\frac{v}{V}$ (по XXV) определяются для каждого прибора, могут быть при нем даны и могут быть самим наблюдателем вновь определены и проверены.

В формуле (XXVII), видно, что величина z преимущественно зависит от $Q\Delta(400 - m_2 - n_2)$, если температурная перемена мала и если $\frac{v}{V}$ также мало. Величина Q находится, как сказано выше, по таблицам, прилагаемым в самом конце статьи. Таких таблиц две: для очень сухого воздуха и для очень влажного воздуха. В первом случае содержание влажности принято равным 30%, во втором 90%. Которую из этих таблиц или какое из промежуточных чисел (для влажности от 30 до 90%) взять в каждом частном случае,—зависит от состояния погоды, как выше было объяснено. Затем, в одной из этих таблиц, по наблюденному барометрическому давлению H и по температуре воздуха T, находится соответственное число, могущее служить в данном случае множителем. Давление предполагается исправленным по отношению к температуре ртутного столба, т. е. считая высоту ртути в барометре при 0°; если давление наблюдено и в верхней и в нижней станции, должно взять среднее. То же относится и до температуры воздуха, наблюдаемой по ртутному термометру T, фиг. 1 и 2, находящемуся при приборе. Судя по таблицам, очевидно, что при незначительных высотах, определяемых дифференциальными барометрами, незначительная неточность в определении давлений и температуры окажет малое влияние на результат.

Положительное или отрицательное значение высоты z (т. е. подъем или опускание, или разность высот точек B—A) определяется, как объяснено было выше, знаками при членах $(400 - m_2 - n_2)$ и $(t_1 - t_2)$.

Легко составить понятие о погрешности определения высот дифференциальными барометрами, если известны погрешности в определении величин $(400 - m_2 - n_2)$ и $(t_1 - t_2)$, предполагая при этом, что величины T и H определены с достаточною степенью точности. Дифференцируя выражение высот (XXVII) по отношению к изменению разных переменных, получаем следующее выражение для погрешностей высот $d(z)$ по отношению к погрешностям манометрического отчета $d(m)$ и погрешности в отчете термометра $d(t)$:

$$d(z) = QK\,d(m) + 20q\,d(t).$$

Эта формула показывает, что при обычной плотности нефтяного масла 0.84 и обыкновенных температуре и давлении воздуха перемена в 1 мм уровня нефти в манометре отвечает высоте

места около в 0.7 м; следовательно, если допустить в наблюдении нефтяного манометра погрешность $d(m)$, равную $\frac{1}{5}$ мм, то получим возможную погрешность в определении высоты 0.14 м. Допустим в то же время погрешность в отсчитывании дифференциального термометра равную $\frac{1}{4}$ деления, т. е. (при обычных размерах, когда q около 0.02) около 0.005° Ц., получим от того погрешность в z в 0.15 м высоты, следовательно, вся погрешность $d(z)$, происходящая от неточности отсчитывания прибора, составит около 0.3 м, т. е. погрешность около фута высоты. Если же отчеты делать точнее, что легко достигается на-глаз, то можно ждать более точного определения высот. Однако, судя по тем сведениям о неточности барометрического нивелирования, которые были изложены в начале статьи, и по нескольким опытам, лично мною сделанным, невозможно ручаться за бóльшую степень точности в определении высот дифференциальным барометром, как до 1 фута, если довольствоваться одним определением и не прибегать к приемам особой тщательности. Практически такая точность во многих случаях совершенно достаточна. Если допустить в ртутном барометре погрешность в $\frac{1}{5}$ мм, то в высоте (судя по XVIII) получим погрешность в 2 м.

Приемы нивелирования высотомерами и способы обращения с прибором

Обратимся теперь к краткому изложению тех способов, которые возможно применить для нивелирования высотомерами в различных случаях. Случаи эти можно разделить на 2 главные категории: определяемые высоты лежат близко одна от другой, а именно в таком расстоянии, что в короткое время есть возможность возвратиться на прежнее место, или же определяемые пункты лежат далеко один от другого. Первый случай будет наиболее обыкновенный, напр. при всех гидротехнических работах, при проведении дорог и т. п. случаях; но второй случай представляет большую общность, потому что гораздо сложнее. Начнем с случая простейшего и опишем затем случай сложнейший. Различные видоизменения приемов будут заключаться в пределах этих двух крайних случаев.

И так, требуется определить разность высот двух пунктов, лежащих близко один от другого, напр. на расстоянии $^1/_4$ версты требуется определить склон почвы. Работу эту можно вести с одним высотомером, но лучше, если будут употреблены два прибора. Если работа ведется одним прибором, то удобнее всего поступать следующим образом: на месте A должно дать дифференциальному термометру прийти в равновесие с окружающею

температурой (выше было объяснено, как это узнать); когда это достигнуто, тогда замечается и записывается в журнал барометрическое давление (оно может быть определено и на ближней неподвижной станции наблюдений, потому что не имеет большого влияния на точность результата) и температура, на ртутном термометре показываемая. Затем правый кран резервуара запирается, запирается также и кран дифференциального термометра и делается на нем отчет, который записывается. После этого, защитив прибор от быстрых перемен температуры, т. е. покрыв его сукном или мехом, и препятствуя солнечным лучам непосредственно нагревать его, переносят его в место *B*. На этом месте его ставят на ту же самую треногу, на которой делалось наблюдение в месте *A*, и после перемешивания мешалкою воды в ванне наблюдается, установилась ли температура. Это узнается и по термометру, и по манометру. Когда температурное изменение прекратится или будет ничтожно малым, записывается положение нефти в манометре и в дифференциальном термометре, а также отмечается и температура *T* ртутного термометра. Эти величины дадут по вышеуказанному разность высот. Но при этом предполагается, что атмосферное давление не изменилось при переноске из *A* в *B*, тогда как в действительности оно может измениться, если расстояние сколько-нибудь велико и если определение совершается при неблагоприятных условиях времени или погоды. Для определения изменения, происшедшего в атмосферном давлении, должно возвратиться, не трогая кранов, на место *A* и наблюсти на нем положение нефти в манометре и термометре. Если атмосферное давление не изменилось, то после всех должных поправок получится для *A* высота $z = 0$ (т. е.: или будет равенство уровней нефти в манометре, или член с *K* будет = члену с *q* в XXVII); если же атмосферное давление изменилось, то об его изменении можно судить по происшедшему изменению уровня нефти в манометре, причем в уравнении XXVII должно принять $z=0$ и на основании этого определить перемену давления.[1] Тогда половину этого изменения можно считать за величину изменения атмосферного давления, происшедшего при первом перенесении прибора из *A* в *B*. Взяв среднее из показаний в *A* и сличив их с показаниями в *B*, можно получить желаемый результат непосредственно, если протекшее время невелико и распределено равномерно. Если затем в *A* опять открыть краны и потом, заперев их, снова перейти в место *B*, то можно иметь второе данное, могущее служить для вывода среднего возвышения *B* над *A*.

---

[1] Я не развиваю здесь тех формул, которые здесь должно применять, а помещаю их в 3-м и 4-м приложениях.

Если для работы употребляются 2 дифференциальные барометра, то один из них во все время остается на месте A и закрывается единовременно с тем прибором, который переносится из A в B. Закрыв оба прибора единовременно, должно следить на неподвижном приборе за изменением атмосферного давления, а подвижной прибор будет служить для определения разностей высот, причем должно вводить поправку на изменение атмосферного давления, наблюдаемого на первом приборе.[1] Пусть, напр., в 12 ч. дня заперты в A краны обоих приборов, а в 12 ч. 20 м. сделано на месте B наблюдение при помощи переносного высотомера. Чтобы узнать превышение B над A, должно узнать, каково было бы в это время (12 ч. 20 м.) показание переносного прибора в A, и это число сличить с показанием в B. Эта простая задача решается, наблюдая в A все время неподвижный высотомер. По его показаниям (напр. по записи через 5 мин.) узнаем изменение давления от 12 ч. до 12 ч. 20 м., а зная, что показывал переносный прибор в A, и прибавляя к нему (после всех поправок) изменение давления по времени, узнаем, что показал бы переносный прибор в A, если бы наблюдался здесь в 12 ч. 20 м. Эти приемы просты и легко выполнимы, а потому я избегаю их подробного описания.

Если расстояния определяемых точек велики, напр. в несколько верст или даже их десятков, то для получения точного числа должно соблюсти много предосторожностей, но и при соблюдении их нельзя ручаться за то, что разность атмосферных давлений, определяемая приборами, будет точно отвечать разности высот, если определение будет сделано один, много — два раза; но если взято будет среднее из нескольких определений, то при небольшой разности высот, если между определяемыми точками не лежит больших пространств воды, гор и т. п. препятствий, мешающих равномерности передачи атмосферного давления, можно ручаться за весьма большую точность определения. Наилучший результат достигается при этом, употребляя для работы сразу три дифференциальных барометра; один из них остается на месте A все время и служит для определения перемены в атмосферном давлении, совершающейся в течение времени, а два другие перевозятся из этого места в другое, и их показания сравниваются с показаниями неподвижного барометра.

Самый простой вид применения высотомера к нивелированию местностей с небольшими уклонами основывается на пропорциональности изменения уровней в манометре с изменением

[1] Дальнейшие сведения о способах применения разных родов дифференциального барометра к определению разностей барометрического давления помещены в сочинении моем „Об упругости газов", т. I, гл. 5* и в 4-м приложении.

* Сочинения, т. VI, 1939, стр. 221—589. (*Прим. ред.*)

высот. Пусть, напр., в месте A сделано наблюдение такого рода, что краны прибора закрываются на земле, а наблюдение на высоте двух метров дает разность уровней $(400—m—n)$, равную d. Если затем прибор, запертый в A, перенести в B и наблюсти там показание манометра D, то при сохранении той же температуры [1] очевидно, что высота z (B над A) относится к 2 метрам так, как D к d, а потому

$$z = \frac{2D}{d}.$$

Этот простейший способ так нагляден и при малых расстояниях и высотах так точен, что может быть с выгодою употребляем во многих случаях.

Тот же способ можно употребить, и с весьма большою пользой, для определения значительных разностей высот, если есть некоторая заранее измеренная высота (напр. высокое здание колокольни или холм, гора, высота которой точно известна), превышающая измеряемые высоты. Пусть при подъеме на эту высоту высотомер дает показание D и пусть ее высота $= Z$, а при подъеме на высоту x показание прибора $= d$; очевидно, что $D:d = Z:x$, откуда $x = Z\frac{d}{D}$.

Здесь не требуется знать плотности воздуха, но нужно отчет d поправить по отношению ко времени и к перемене температуры прибора.

Сверх того замечу, что для определения больших разностей высот, напр. горы в несколько сот метров высотою, судя по всему сказанному выше, нет практической выгоды предпочесть высотомер ртутному барометру. [2]

Теперь постараюсь подробно изложить способы для предотвращения порчи высотомеров и приемы для их исправления в случае, когда порча произойдет. При этом необходимо сделать различие между повреждениями внутренних частей прибора и тех, которые находятся снаружи. Все внутренние части высотомеров металлические, а потому при сколько-нибудь осторожном обращении с приборами никакой порчи в них не происходит; тем не менее самому исследователю необходимо убедиться в надлежащей исправности прибора, особенно после пересылки

[1] Если температура изменилась, то по показанию дифференциального барометра можно исправить показание манометра, пользуясь формулой (27).

[2] Для сравнения применимости дифференциальных и ртутных барометров к определению высот все необходимые формулы даны выше, а в гл. V вышеупомянутого сочинения „Об упругости газов" * на стр. 150 вопрос об относительной применимости ртутных и дифференциальных барометров к определению различных высот рассмотрен в особом параграфе на стр. 150 и 151.

* Сочинения, т. VI, 1939. (*Прим. ред.*)

или перевозки, а именно: воздушного резервуара и дифференциального термометра. Оба они должны при запоре держать вполне герметически. При составлении прибора такая герметичность испытывается следующим способом, который можно приложить и к готовому прибору, но который требует воздушного насоса. Для полного испытания герметичности воздушного резервуара из манометра должно удалить нефтяное масло; это достигается таким образом, что запор левого крана вывинчивается, а трубка с хлористым кальцием соединяется с каучуковою трубкой. Вдувая в эту последнюю воздух, можно выдавить все нефтяное масло из манометра в открытый левый кран. Для того, чтобы при этом не произошло выливания нефти на шкалу, прибор должно положить так, чтобы манометр был в горизонтальном положении, и в открытый левый кран вставлять куски пропускной бумаги, вбирающей в себя выдавливаемое воздухом нефтяное масло. В таком же положении можно вливать в манометр после окончания испытания желаемое количество нефтяного масла. Когда нефтяное масло удалено из манометра, отверстие левого крана запирается пробкою, чрез которую проходит стеклянная трубка, снабженная двумя ветвями. Пробка и стеклянная трубка, в ней закрепленная, а также и свободное отверстие левого крана заливаются мастикой,[1] для того чтобы все соединение стеклянной трубки с прибором было вполне герметично. Это может быть достигнуто в совершенстве только тогда, когда левый кран перед наложением мастики достаточно нагрет, для того чтобы на нем не осталось следов влажности. Когда герметическое соединение стеклянной трубки с прибором достигнуто, тогда нисходящую ветвь присоединенной стеклянной трубки должно погрузить в сосуд со ртутью, а другую ветвь соединить с воздушным насосом. Заперев правый кран, этим насосом должно выкачать воздух из прибора до того, чтобы давление оставшегося в приборе воздуха было возможно малое; тогда высота ртути в трубке будет почти равна высоте барометра. Когда это достигнуто, соединение с воздушным насосом прекращается при помощи зажима,[2] а положение ртути в стеклянной трубке замечается. Если прибор держит, т. е. если сосуд вполне герметичен, то положение ртути останется на том же месте в течение сравнительно долгого времени, пока барометр остается неизменным. По мере поднятия и опускания ртути в барометре, будет происходить поднятие и

---

[1] На стр. 68—71 моего сочинения „Об упругости газов", т. I* описана рекомендуемая мною мастика и способы ее употребления.

[2] Устройство и употребление зажимов описано там же, стр. 80. **

* Сочинения, т. VI, 1939, стр. 327—331. (*Прим. ред.*).

** Там же, стр. 343. (*Прим. ред.*)

опускание ртути и в стеклянной трубке. При таком испытании необходимо однако иметь уверенность в том, что соединения стеклянной трубки с прибором и насосом, а также и запор, прекращающий сообщение с насосом, держат совершенно герметически. При помощи мастики такая герметичность однако достигается столь легко, что при небольшом навыке можно в ней быть вполне уверенным. Если ртуть в стеклянной трубке не падает, то можно быть уверенным как в воздушном резервуаре, так и в правом кране прибора, если же замечается падение ртути, то оно может происходить от двух причин: или от того, что в воздушном резервуаре или его соединении с манометром находится отверстие, или от того, что правый кран не запирает герметически. В последнем можно легко убедиться, если вместо стального запора правого крана поставить временно герметический запор, при помощи мастики, напр. если взять острую деревянную палочку, погрузить ее в мастику и ею запереть отверстие правого крана. Сделав это с некоторою аккуратностью, можно быть уверенным в том, что тогда правый кран заперт герметически. Если повторить опыт с воздушным насосом, то можно убедиться, происходит ли пропускание от погрешности в кране или от пропускания сосуда. Погрешности в кране, впрочем, весьма трудно ожидать, если только краны в действительности приготовляются первоначально тщательным образом и если с ними обращаться с некоторою осторожностью; тогда никакого повреждения внутри их происходить не может. Если стальной запор крана заржавеет, то достаточно небольшого количества воска, которым смазывается коническая часть запора, для того, чтобы опять придать крану герметичность.

Вместо вышеописанного, все-таки сложного, испытания гораздо простейшего и более скорого испытания можно достигнуть при помощи заключающегося в манометре нефтяного масла. Для этого должно поступать так: трубка с хлористым кальцием соединяется с каучуковою трубкой, в прибор вдувается воздух до тех пор, пока нефть не станет в открытой ветви в самое верхнее свое положение. В этом состоянии правый кран запирается, вода в приборе перемешивается и замечается положение нефти. Если прибор не держит, то нефть будет падать; если же прибор герметичен, то нефть будет сохранять свое положение, пока температура прибора и атмосферное давление остаются неизменными. Когда испытан правый кран, можно запереть левый и открыть правый; тогда постоянство уровня нефти покажет герметичность левого запора. Такое испытание прибора должно производить по временам со всяким высотомером, потому что не в кранах и не внутри прибора, а в наружных частях его могут произойти некоторые повреждения, напр. в той части, в которой соединяется мастикою

идущая изнутри медная трубка со стеклянною трубкой нефтяного манометра. Это соединение достигается мастикою, а мастика на холоду, при ударах и от действия некоторых растворяющих веществ, напр. спирта, может давать трещины, растворяться и т. п., а тогда мастичное соединение перестанет быть герметическим. Впрочем, такого рода повреждение, если бы оно и случилось (до сих пор еще ни разу я не имел случая встретить такое обстоятельство), чрезвычайно легко поправимо, потому что при нагревании того места, где находится мастика (напр. при помощи спиртовой лампы), до той степени, чтобы она расплавилась (около 50°), вновь произойдет герметическое соединение. Мастику, находящуюся в местах соединения медных частей со стеклянными, можно всегда и возобновить, если только в том встретится надобность, потому что она весьма легкоплавка.

Во время пересылки прибора и его перенесения с места на место, и даже во время работы с прибором, от неосторожного с ним обращения может произойти переливание нефти из манометра в воздушный резервуар, или внаружу прибора. Это может произойти, напр., тогда, когда оба крана (правый и левый) открыты, и прибор наклонен до того, что нефть может выливаться из манометра. Этого не происходит, если левый кран закрыт: тогда можно прибор перевернуть, и нефть все-таки не выливается, что зависит от того обстоятельства, что трубка манометра представляет весьма малый внутренний диаметр. Удаление всей нефти или только части ее из манометра может случиться также оттого, что (при открытом левом кране и при закрытом правом) атмосферное давление значительно увеличится до того, что разность упругостей внутреннего и наружного воздуха будет превышать высоту столба нефти в манометре. При значительном понижении температуры и при запертом правом кране может также случиться перебрасывание нефти внутрь прибора. Обратное явление может произойти при значительном повышении температуры, когда воздух, запертый в приборе, расширится до того, что выбросит нефть в наружное отверстие манометра. Ничего этого случиться не может, если соблюдать всегда ту предосторожность, чтобы при сохранении прибора левый кран был заперт; тогда всякая перемена в отношении упругости внутреннего и наружного воздуха не будет иметь никакого почти влияния на перемену уровня нефти в манометре. Если же случится вышеуказанное переливание, происходящее от несоблюдения приведенного правила, то дело легко поправляется нижеуказанными способами. Надо заметить, что если попадет внутрь прибора некоторое количество нефти, то она нисколько не будет портить действия прибора, потому что емкость воздушного резервуара сравнительно чрезвычайно велика с объемом нефти, в манометре содержащейся. Порча может

произойти только тогда, когда часть нефти останется в тонкой медной трубочке, фиг. 1, соединяющей манометр с воздушным резервуаром. В этой трубочке не должно оставаться нисколько нефти, так как в противном случае прибор не будет правильно действовать, столб нефти, заключающейся в медной трубочке, будет мало изменять свое положение при перемене давлений и будет препятствовать правильному действию прибора. Поэтому, если произойдет случайное выливание нефти из манометра, необходимо убедиться в том, что в медной трубочке не осталось нефти. Если выливание произошло чрез наружный кран, то тогда, открыв стальной запор *E*, фиг. 1, этого крана, легко пропускною бумагой вынуть остаток нефти из конца крана, помогая тому вдуванием воздуха внутрь прибора через трубку с хлористым кальцием. Если же втягивание нефти произошло внутрь прибора, то тогда должно вдувать в трубку с хлористым кальцием воздух до тех пор, пока он не вытеснит всю нефть из манометра чрез открытый левый кран. Когда это достигнуто, тогда должно долгое время втягивать чрез трубку с хлористым кальцием воздух. Он будет тогда проходить через весь прибор и через медные трубочки и вытеснит находящуюся в них нефть. Повторив это несколько раз, и притом слабо подогревая находящиеся снаружи медные трубочки, можно достигнуть того, что вся нефть удалится из этих трубочек. Об ее полном удалении из них легко уже затем судить с точностью, если влить в манометр некоторое количество нефти и открыть оба крана. Тогда уровни нефти будут одинаковы в обеих ветвях, если все трубки свободны от нефти; если же они не свободны, то положение нефти в обеих ветвях не будет становиться одинаковым при открытых кранах после некоторого перемещения, произведенного вдуванием воздуха.

Наполнение манометра, свободного от нефти, этою последней, как упомянуто было выше, производится через левый кран *F*. Прибор должно положить в горизонтальное положение шкалами кверху и вливать стеклянною пипеткой (с тонким отверстием) нефть в отверстие левого крана. Когда в манометр взойдет надлежащее количество нефти, тогда остаток ее выбирается из крана куском пропускной бумаги; прибор осторожно ставится в вертикальное положение, и затем надо убедиться в том, что в медной трубочке, идущей от левого крана к манометру, не осталось нисколько нефти, что легко сделать вышеописанным способом. При таком вливании нефти, равно как и в некоторых других случаях, может произойти разрыв в столбе нефти, заключающейся в манометре, так что пузырьки воздуха будут перемежаться со столбами нефти. В таком состоянии прибор не может правильно действовать, потому что при открытых кранах положения нефти в обеих ветвях не будут одинаковы. Удаление

пузырьков воздуха из манометра достигается быстрым передвижением столба нефти и нагреванием ее. Для этой цели чрез хлористый кальций вдувается воздух до тех пор, пока нефть в открытой ветви не достигнет верхнего своего положения, и затем нефти дают быстро падать. Повторяя это несколько раз, можно вполне удалить пузырьки воздуха, потому что при всяком таком быстром передвижении столба нефти пузырьки воздуха подвигаются кверху. Если при этом стеклянную манометрическую трубку подогревать пламенем спиртовой лампы, то полное удаление пузырьков достигается чрезвычайно быстро.

Разрыв нефти воздушными пузырьками еще легче может совершаться, при неосторожном обращении, в стеклянной трубочке дифференциального термометра, потому что она несравненно тоньше манометрической трубки; но зато здесь и поправка совершается чрезвычайно скоро, особенно тогда, когда пузырек воздуха находится в верхней части нефтяного столба. Тогда, открыв кран дифференциального термометра *K*, фиг. 1, и пробку *P*, закрывающую отверстие капиллярной трубки термометра, дают нефти занять свое естественное положение, а в отверстие стеклянной трубки вставляется катышек из пропускной бумаги, который впитывает в себя нефть, если она находится в верхней расширенной части термометрической трубки. Когда воздушный пузырек находится на некоторой глубине, до которой не достигает катышек бумаги, тогда должно вполне вывернуть кран *K*, запирающий дифференциальный термометр, и в том отверстии, которое таким образом освободилось, немного сдавить воздух, напр. при помощи пробки, даже просто пальцем или вдуванием воздуха. Чрез это уровень нефти в стеклянной трубке поднимется до того, что часть нефти, находящейся над пузырьком, поглотится бумагой. Такой прием годится тогда, когда над воздушным пузырьком находится только очень немного нефти. Небольшое количество нефти может быть удалено из дифференциального термометра без всякого для него вреда, потому что в него вливается большее количество нефти, чем нужно для наполнения дифференциального термометра. Но если такой прием повторять многократно, то все-таки со временем количество нефти уменьшится до того, что она не будет выполнять всего дифференциального термометра, а потому лучше употреблять другой прием, годный и в том случае, когда пузырек воздуха попадает в нижнее расширение термометрической трубки. Это последнее может случиться, напр., при перевозке прибора, наполненного нефтью, и при его опрокидывании. Тогда, для удаления пузырька воздуха, должно открыть термометрический кран, охладить прибор, запереть термометрический кран и нагреть прибор, что достигается легко, вливая в водяной сосуд прибора холодной или теплой воды.

При расширении, происходящем от нагревания, нефть вытеснит вместе с собою в верхнее расширение капиллярной трубки весь воздух, и при открытии крана дифференциального термометра получится столб нефти, не разорванный воздушными столбиками. Удаление воздушного столбика нередко может быть произведено еще проще, при помощи пробки P, фиг. 1, запирающей наружное отверстие капиллярной трубки термометра. Эта пробка должна плотно приходиться к этому отверстию, и в таком случае она действует как поршень; следовательно, надавливая ее, можно, при открытом кране K, заставить уровень нефти в капиллярной трубочке понизиться до того, что она выйдет вполне из капиллярной трубки и вместится в нижнее расширение ее. Тогда должно закрыть кран термометра и вынуть пробку. Открывая затем понемногу кран термометра, достигнем того, что нефть будет представлять неразорванный столб. При быстром падении нефти в капиллярной трубке, на стенках последней могут оставаться следы нефти, которые потом скопляются в столбик, захватывающий собою столб воздуха, а эти маленькие столбики нефти легко удаляются при помощи пропускной бумаги, как сказано с самого начала этого параграфа, или при помощи надавливания пробкою, как тотчас объяснено.

Дифференциальный термометр должен быть также испытан относительно своей герметичности. Применяя воздушный насос, можно здесь употребить тот самый способ, который описан для испытания герметичности воздушного резервуара. Но проще достигается такое испытание при помощи пробки, запирающей отверстие стеклянной трубки, если пробка плотно приходится к ее отверстию и действует как поршень. В этом последнем легко убедиться при открытом кране термометра, потому что тогда через надавливание пробки нефть весьма быстро изменяет свой уровень. Если кран термометра запереть и надавливать пробку на отверстие термометра, то уровень нефти должен изменяться весьма незначительно, если кран K запирает отверстие термометра с точностью и если в термометре нет никаких других отверстий. Маленькое изменение в положении нефти при этом всегда есть, потому что через надавливание пробкою воздух, под нею находящийся, сжимается и оказывает усиленное давление, под влиянием которого стенки термометра расширяются, а самая нефть несколько сжимается. Если же есть отверстие в приборе, то изменение в положении нефти будет весьма значительное и уровень нефти не примет первоначального положения, если пробку отнять. При надавливании пробкою такое изменение может происходить еще и от другого обстоятельства, а именно от того, что внутрь резервуара термометра попадет пузырек воздуха. Это может случиться, если прибор опрокинут при открытом кране термометра и часть нефти

выльется. По этой-то причине, при пересылке на далекие расстояния, наполнение термометра нефтью лучше производить самому исследователю. Такое наполнение пустого термометра нефтью производится, приспособляя к отверстию стеклянной термометрической трубки воронку с тонким отверстием (горло стеклянной воронки должно быть вытянуто в трубочку внешнего диаметра не более $1^1/_2$—2 мм), вставленную через пробку, плотно приходящуюся к верхней части термометрической трубки. Укрепив в этом отверстии пробку с воронкой, должно влить в воронку нефти и вынуть кран, запирающий термометр. Тогда нефть будет вливаться в резервуар термометра, проходя чрез его капиллярную трубку. При этом во всяком случае останется некоторый пузырек воздуха в нижнем расширении капиллярной трубки, но его легко удалить после того, когда уже влито некоторое количество нефти. Для этой цели в то отверстие термометра, где вставляется запор, должно вдувать воздух. Он поднимет уровень нефти в капиллярной трубке и вытеснит воздух, в ней бывший, сперва в верхнее расширение, а именно в приставленную воронку. После такого удаления воздуха, нефть будет вливаться в резервуар термометра скорее, и такое вливание должно продолжать до тех пор, пока нефть не наполнит всего термометра. В этом последнем легко убедиться, вставляя на место запора кусок бумаги, щепку, стеклянную трубку или что-либо подобное. Если нефть наполнила весь резервуар термометра, то она будет находиться над ним, т. е. будет впитываться бумагой или смачивать щепку. Тогда должно прекратить дальнейшее прилитие нефти, заперев отверстие термометра запором, удалить нефть из воронки и затем вынуть эту последнюю. Когда термометр наполнен таким образом, в нем не остается воздуха; если же воздух попадет со временем в термометрический резервуар, то должно вылить из термометра часть нефти и затем, вместо выбывшей, прилить вышеописанным способом недостающее количество нефти. Вообще же необходимо наблюдать, чтобы в термометре заключался избыток нефти. Куском бумаги легко в этом убедиться, вынув запор. С дифференциальным термометром может быть еще такой случай, что соринка западет в его отверстие (особенно когда кран K вынимается), и когда кран не будет плотно запирать или отверстие термометра заполнится соринкою. Узнается это последнее легко, потому что тогда при открытии крана нефть в термометрической трубке не становится на свое обычное место. Устраняется это также легко. Стоит вынуть кран K,[1] вставить вместо него деревянную палочку с заостренным (пирамидально, а не конически) нижним концом,

[1] Для этого его должно вполне отвернуть и вынуть из углубления пинцетом или тем же ключом, который служит для запора.

надавить им на коническое углубление, запираемое краном, и тогда повернуть несколько раз заостренную палочку около своей оси. Тогда сор освобождается и удаляется, пропустив сквозь отверстие, запираемое краном, проволоку. [1]

Вышеуказанные случайности вполне предотвращаются сколько-нибудь осторожным обращением с прибором и внимательным с ним ознакомлением. Особенную же осторожность необходимо соблюдать *при пересылке прибора на далекие расстояния, потому что при этом прибор может иметь различные положения. Лучше всего при этом пересылать прибор, из которого удалена вполне нефть*, и после перевозки наполнить ею термометр и манометр вышеописанным способом. Если же желают переслать прибор, наполненный нефтью, то левый кран манометра должен быть непременно заперт, потому что иначе манометрическая жидкость легко может вылиться. Для предотвращения этого обстоятельства, с термометром в этом случае лучше всего поступать так: вынув запор термометра, должно вдувать в то место, где он вставляется, воздух до тех пор, пока нефть в капиллярной трубке поднимется почти до самого края стеклянной трубки. Тогда запирают отверстие ее плотно пробкою так, чтобы не осталось под пробкою воздуха. Для того, чтобы пробка не пропускала при этом через себя нефти, лучше пробку предварительно пропитать клеем или после запора замазать ее снаружи клеем. Когда это достигнуто, то в свободное отверстие термометра надо влить некоторый избыток нефти и вставить запор, но плотно не запирать его, потому что при плотном запоре от случайного нагревания может произойти разрыв термометра, так как нефть имеет весьма значительный коэффициент расширения и от давления сравнительно мало сжимается. Свободную часть резервуара Q, где нет нефти, должно ею залить, но не до края, а потом должно запереть плотною пробкой, пропитанною клеем. Тогда нефть, запертая с обеих сторон в термометре, не будет выливаться при перевозке, но при опрокидывании прибора все-таки может под отверстие крана попасть пузырек воздуха; его должно тогда удалить вышеописанным способом. Но во всяком случае не должно запирать наружного отверстия сосуда Q дифференциального термометра пробкою, если запор K и пробка P плотно не заперты, потому что тогда под пробкою останется воздух, который может от нагревания расшириться, и тогда значительное количество нефти из термометра выльется чрез капиллярную трубку внаружу прибора. [2] Лучше, если то отверстие тер-

---

[1] Не должно опасаться, что сор попадет затем в стеклянную трубку, потому что в резервуаре термометра делается особое углубление, куда собирается могущий быть сор.

[2] Эти замечания взяты с действительности.

мометра, в котором находится запор, никогда не закрывается пробкою. Во всяком случае, когда нефть влита в термометр, безопаснее всего прибора не перевертывать дном кверху, потому что при этом воздух может ворваться или чрез капиллярную трубку, или через запор внутрь термометра. Если перевозку производить с закрытым запором, то необходимо оставить капиллярную трубку открытою, но и тогда при случайном охлаждении чрез нее может ворваться внутрь резервуара некоторое количество воздуха. По этой-то причине и должно советовать дальнюю пересылку, почти неизбежную с опрокидыванием, производить с прибором, не содержащим нефти, по крайней мере в термометре.

Водяной резервуар во всяком случае всегда должен быть свободен от воды при дальних перевозках, потому что ее влить весьма легко. Удалить воду из водяного резервуара можно прямым выливанием, если, во-первых, запереть левый кран манометра и термометрический запор, а также при этом должно запереть и отверстие над запором, находящееся в термометре. Тогда можно на недолгое время, потребное для выливания воды, опрокинуть прибор совершенно безопасно. Лучше же всего выливание воды производить при помощи сифона. Тогда нет нужды в опрокидывании прибора. Вместо сифона может служить каучуковая трубка, имеющая длину, раза в три превышающую высоту прибора. Погрузив такую каучуковую трубку в отверстие Z, фиг. 1, назначенное для выливания воды, должно всосать эту воду чрез каучуковую трубку, и когда она наполнит всю трубку, зажать свободное отверстие трубки и обратить его книзу так, чтобы оно было ниже дна прибора. Тогда вода выльется чрез каучуковую трубку, как чрез сифон.[1] Возобновление воды полезно производить по временам в приборе ради того, чтобы удалять окислы цинка и меди, образующие муть в воде. Такое удаление воды полезно производить ежедневно в том случае, если исследование производится в такое время года, когда температура наружного воздуха значительно отличается от комнатной температуры. Особенно это важно наблюдать в приборах, хорошо защищенных от перемен температуры при помощи деревянной наружной оболочки. В самом деле, прибор, стоявший долгое время в комнате, примет ее температуру и следовательно в работе постоянно будет менять эту температуру, если комнатная температура значительно отличается от наружной. Это устраняется, если ежедневно при окончании работы выливать из прибора воду, а при начале работы вливать в прибор такую воду,

[1] Лучше, если такой сифон отдельно наполнять водою, зажать один конец, другой опустить в Z и так вылить воду из прибора. Дело в том, что вода, стоявшая долго в цинковом сосуде, содержит соли этого металла.

которая стояла в условиях внешней температуры. Тогда внутри прибора скоро получается температура, близкая к температуре наружного воздуха. Если работа производится при температурах ниже 0°, тогда вместо воды должно брать спирт. При температурах, близких к 0°, полезно прибавлять к воде несколько льду или снега для того, чтобы иметь всегда постоянную температуру 0°.

Не мешает заметить, что разбитые стеклянные трубки манометра и термометра могут быть в каждом приборе легко заменены новыми. При этом должно только уметь обращаться с мастикою, служащею для скрепления металлических трубок со стеклом, что описано в подробности в моем сочинении „Об упругости газов", гл. III.[1] Те пробки, которые соединяют медные трубочки (в фиг. 1, напр., видна пробочка около буквы *C*) с стеклянными трубками, должны быть пропитаны клеем. Если не соблюсти этой предосторожности, то нефть, особенно в термометре, может впитаться через пробку и разъесть со временем мастику, доставляющую герметичность соединению. Лучше соблюдать эту предосторожность не только для дифференциального термометра, но и с теми пробками, которые закрывают отверстия манометра и заливаются мастикою, потому что в манометре от случайных повреждений нефть может доходить до пробки, чего впрочем нормальным образом не должно совершаться.

Повреждения в шкалах прибора требуют их возобновления. Только в немногих приборах, устраиваемых под моим наблюдением, употребляются металлические шкалы; гораздо удобнее во всех отношениях бумажные шкалы, обыкновенно употребляемые в высотомерах, потому что отчет на них несравненно яснее. Металлическая пластинка дает отблеск, мешающий ясности отчета, чего нет при бумажной шкале. Когда требуется заменить шкалу, то новую должно наклеить на ее место и покрыть затем раствором коллодия, заменяющим лак.

Если читатели этих практических заметок встретят, сверх того, некоторые новые, мне еще не встретившиеся практические затруднения или случайности в применении высотомеров, то они не откажутся сообщить о них мне для того, чтобы иметь возможность испытать средства для предотвращения этих новых препятствий к распространению прибора, могущего, по моему мнению, быть полезным для многих практических целей.

Прибавление 3 (к стр. 142). *О температуре прибора*

Совокупляя в одно формулы XX (для дифференциального барометра) с формулою XXI (гипсометрическою), мы достигаем

[1] Сочинения, т. VI, 1939, стр. 326—358. (*Прим. ред.*)

сокращения, считая что T_1 и T_2 в первой из этих формул равны T_1 и T_2 во второй формуле, а именно полагая, что $1+kT_1$ в первой формуле $=1+kT_2$, так как обе суть температуры, наблюденные в начальной станции A, где краны запираются. Но этого равенства температур может и не быть в действительности, если температура ванны высотомера не равна температуре воздуха и той, какую дает наружный ртутный термометр, а это произойдет легко, если не соблюдать указаний, данных на стр. 172 (переменять ежедневно воду прибора и заменять ее такою, которая имеет температуру окружающего воздуха), и особенно может быть ощутительной для приборов, хорошо защищенных от перемен температуры, [1] и тогда, когда наружная температура значительно разнится от той, какую имеет прибор. Об этом можно сделать суждение, следя за запертым прибором на первой станции. Если температура прибора значительно разнится от температуры окружающего воздуха, то и дифференциальный термометр, и жидкость в наружной ветви манометра будут скоро и постоянно изменять свое положение в одну сторону, чего не произойдет, если температуры прибора и наружного воздуха будут между собою близки. *Этого последнего должно стараться достичь на той станции, где краны запираются* (A). Если при переходе в другую станцию (B) температура наружного воздуха и будет другая — все же формула (XXVII) вполне применима, ибо температура прибора, несмотря на то, что изменилась температура внешнего воздуха, будет мало отличаться от первоначальной ($qt_1 - qt_2$ будет мало), а температура наружного воздуха в новой станции (B) взойдет, как влияющая на среднюю плотность воздуха, если при определении Q (в XXVII) значение T есть среднее из наблюденных температур воздуха T_1 и T_2 в A и B. Если же температура прибора в A и B будет значительно различаться от температуры окружающего воздуха,

---

[1] Особенно для окруженных деревянным ящиком и мастикою, как можно судить по следующему наблюдению. Недавно сличал я по отношению к быстроте перемен температуры три одинаковых по устройству высотомера. № 1 жестяной (как на фиг. 2); № 2 такой, который облечен бумазеею и деревянным ящиком, и № 3 такой, который залит мастикою, так что между стенками водяного резервуара и деревянного внешнего ящика находится сплошной слой смолообразного вещества. Во все налита была тепловатая вода в 3 ч. 10 мин. Затем они вынесены из комнаты на улицу, где была тогда температура $-1°.7$ Ц.

Отчеты термометров дали следующее:

	№ 1	№ 2	№ 3
В комнате в 3 ч. 40 м.	25.°6	25.°9	25.°4
На улице „ 4 „ 15 „	19.°2	23.°8	23.°6
„ 4 „ 35 „	16.°1	22.°5	22.°3

Это показывает, что заливка мастикою, и особенно окружение деревянною оболочкой, значительно замедляют температурные перемены, что очень выгодно для точности определения.

то для точности вывода должно: 1) знать отдельно температуру прибора T_a на первой станции. Для этой цели должно иметь особый термометр, который должен быть погружен (чрез отверстие z, фиг. 1) в ванну прибора; 2) знать на станциях A и B температуры T_1 и T_2 атмосферного воздуха (в тени и удалении от почвы и людей). Средняя температура T даст величину, необходимую для расчета Q. При этом должно заметить, что ртутный термометр прибора (T, фиг. 1 и 2) не может в указанных условиях служить достаточным указателем температуры наружного воздуха, если прибор имеет самостоятельную и другую, чем атмосферная, температуру. Для определения последней необходимо тогда иметь отдельный, свободный ртутный термометр. 3) Для расчета высот должно сперва расчесть разность давлений (в миллиметрах ртутного столба) $H_1 - H_2$ по данным высотомера (формула XX), а потом (по формуле XXI) расчесть высоту по данным для атмосферного воздуха.

Для этого случая, и вообще для расчета высот, можно применять сверх указанных формул еще следующую формулу, в которой не введены сокращения, примененные при выводе (XX) и следующих за нею формул. Эта (XXVIII) формула дает высоту точнее других и может быть применяема, когда температурная разность $(qt_1 - qt_2)$ и емкость манометра $\frac{v}{V}$ достигают значительных величин.

$$z = Q\left[\left(\Delta + \frac{6.8\,H_1}{1 + A}\,\frac{v}{V}\right)(400 - m_2 - n_2) + \right.$$
$$\left. + \frac{0.00363}{1 + A + k\,T_a} H_1 q\,(t_1 - t_2)\right], \quad \ldots\ldots \text{(XXVIII)}$$

где:

$$Q = \frac{Q_1 + Q_2}{2}.$$

$$Q_i = \frac{7990}{13.596}\,\frac{1 + kT_i}{H_i - 0.377\,h_i}$$ (см. приложение 6).

Q_1 по данным для атмосферного воздуха того пункта (A), где краны заперты, а Q_2 для другого пункта (B), где делаются отчеты: на приборе t_2, m_2, n_2 и в воздухе T_2, H_2 и h_2 (упругость водяного пара h_i).

$\Delta = \frac{\Delta_0}{1 + 0.0008\,T}$, где T есть температура нефти на второй станции (B).

H_1 барометрическое давление при 0° по ртутному или анероидному барометру, исправленное во всех отношениях.

$\frac{v}{V}$ отношение емкости 1-го миллиметра манометрической трубки к емкости воздушного резервуара высотомера.

$A=\frac{400-m_2-n_2}{2}\cdot\frac{v}{V}$. Величина эта очень мала в обычных высотомерах, а потому в формулах (XX—XXVII) принята=0.

m_2 и n_2 отчеты на манометре, сделанные на второй станции (*B*).

$k=0.003684$.

T_a температура ванны высотомера на первой станции (*A*).

t_1 и t_2 отчеты на дифференциальном термометре высотомера, сделанные на первой (*A*) и второй (*B*) станциях.

Считаю неизлишним заметить здесь еще следующее: 1) Можно искусственно изменять температуру прибора и ею одною (доводя каждый раз манометрический отчет до первоначального или до некоторого определенного) руководствоваться в определении высот. Каждый градус Цельсия отвечает примерно 29 метрам высоты. При подъеме (z положительно) должно охладить, при спуске нагреть прибор. 2) Увеличение $\frac{v}{V}$, происходящее от уменьшения воздушного резервуара или от увеличения диаметра манометрической трубки—равнозначуще с увеличением Δ, плотности манометрической жидкости.

Прибавление 4. *О порядке наблюдений, о их записи и о расчете*

Для удобства практического применения высотомера к нивелированию необходимо при каждом приборе (снабженном своим нумером) иметь особый журнал. В нем должны быть обозначены:

1) Плотность Δ нефтяного масла, содержащегося в манометре. Она изменяется с температурою T, показываемою наружным ртутным термометром, а потому выражается, судя по сказанному на стр. 144, так:

$$\Delta=\frac{\Delta_0}{1+0.0008\,T}=\Delta_0-aT.$$

Величина Δ_0 определяется, как описано на стр. 144, или прямо дается заранее для прибора. Величина a принимается данною и $=0.0008\ \Delta_0$ или находится самим наблюдателем, определив плотность нефти Δ_1 при T_1 и Δ_2 при T_2, ибо:

$$\Delta_1=\Delta_0-aT_1 \text{ и } \Delta_2=\Delta_0-aT_2,$$

откуда:

$$a=\frac{\Delta_1-\Delta_2}{T_2-T_1}.$$

2) Затем для каждого прибора должно быть дано отношение $\frac{v}{V}$ емкости одного миллиметра манометрической трубки к емкости воздушного резервуара прибора. Способ нахождения этого отношения указан на стр. 153.

3) На стр. 155 и сл. дан способ определения величины q, т. е. долей градуса Цельсия отвечающих одному делению дифференциаль-

ного термометра. Величина эта должна быть определена для каждого прибора.

4) Если желательно при помощи высотомера иметь возможно точные результаты наблюдений, то не только три выше исчисленные величины $\left(\Delta, \frac{v}{V}, q\right)$ должны быть точно известны (определения повторены и проверены), но необходимо иметь при высотомере анероид, поправки которого (см. стр. 121 и сл.) должны быть известны и вписаны в журнал, равно и поправки ртутного термометра, ибо в формуле (XXVII), по которой рассчитывается высота, величины Q и K зависят от T и H и формула составляется, предполагая, что T есть исправленная температура по стоградусному термометру, а H исправленное (приведенное к 0°) давление атмосферы. Однако, как было выше сказано (стр. 125, 145, 146), если в T и особенно в H взойдут довольно значительные погрешности — они мало будут влиять на результат расчета.

Применяя данный высотомер для нивелирования, должно запись наблюденных величин вести следующим образом. На каждом пункте наблюдения должно записать:

a) Нумер пункта по порядку.

b) Естественные признаки пункта, или его расстояние по известному румбу от некоторой данной точки, или какие-либо другие отличительные особенности, а также нумер пункта по плану.

c) Время, в которое произведен отчет [1] данных на приборе.

d) Отчет по шкале ртутного термометра; этот последний должно сделать прежде, чем отчет на манометре и на дифференциальном термометре, чтобы избежать погрешности от приближения наблюдателя.

e) В особой графе записываются показания манометра. Эти последние должно читать, поставив глаз, по возможности, в один уровень [2] с отчитываемым мениском. Отчет легче и точнее производить не по низшей точке вогнутого мениска нефти, а по верхнему его краю, который ясно виден, особенно если нефть окрашена. Записывают десятые доли миллиметра. Нет нужды отличать правую и левую ветви манометра, ибо для расчета (XXVII) применяется сумма отчетов, сделанных на обеих ветвях. Поэтому в журнале наблюдений полезно сделать для записи манометра

[1] Если температура прибора не установилась совершенно постоянною или если на данном пункте почему-либо долго остаются и вообще если есть время, весьма полезно сделать на данном месте несколько раз отчет чрез определенные промежутки времени.

[2] Чтобы избежать так называемой паралактической погрешности отчета, зависящей от неодинакового расстояния объекта (манометра) и шкалы от глаза, должно стараться прибор всегда при наблюдении держать в таком положении (на треноге), чтобы *шкала была вертикальна, и ставить прибор всегда* на одно и то же расстояние от почвы.

широкий столбец и между отчетами ветвей манометра ставить знак +, а затем после знака = тут же вписывать и сумму отчетов. Напр. 102.1+304.5=406.6 означает то, что наблюдено на манометре в данной станции.

f) Затем в особом столбце вписывается отчет по шкале дифференциального термометра, а также и

g) отчет на анероидном барометре, если он переносится вместе с высотомером.[1]

Кроме этих данных, собираемых на нивелируемых пунктах *A*, *B*, *C* и проч., полезно, а для точных наблюдений при значительных расстояниях даже и необходимо, вести на отдельном не переменяющем своего места (напр. в комнате) высотомере наблюдения над переменою атмосферного давления во все время, когда производятся наблюдения в пунктах *A*, *B*, *C* и проч. Для этих наблюдений удобнее всего избирать пункт, лежащий между крайними точками, нивелируемыми в данное время. Так, например, если в утро предполагается измерять пункты, отстоящие на 5 верст от начального пункта *A* до пункта *M*, то неподвижный прибор полезно поместить в пункте, находящемся на расстоянии $2^1/_2$ верст от *A* по направлению к *M*. Избранный для неподвижного прибора пункт *E* должен быть по возможности защищен от перемен температуры, например в тени дерев, или в здании, или, по крайней мере, под покрышкою зонтом, или тому подобною защитою. В этом пункте *E* наблюдения производятся чрез возможно краткие промежутки времени особым наблюдателем, часы которого должны быть пред началом и концом наблюдений сверены с теми часами, по которым записывается время при переносном приборе, находящемся последовательно в *A*, *B*, *C* и проч. Способ пользования неподвижным прибором для поправки данных для переносного высотомера может быть различный, но самый простейший и удобнейший есть следующий. Показания неподвижного высотомера должно расчесть точно так же, как рассчитываются показания переносного, т. е.: выразить в метрах (z по формуле (XXVII) и по постоянным Δ, $\frac{v}{V}$, q для этого прибора) наблюденные перемены давления, подобно тому как в этом приложении (4-м) вычислены по данным переносного прибора высоты пунктов *B*, *C*, *D*... над *A*. Высоты y, найденные для неподвижного прибора, покажут поправки высот по времени и результат такого расчета даст таблицу следующего вида:

m_0	m_1	m_2	m_3	m_4 . . . . .
0	y_1	y_2	y_3	y_4 . . . . .

[1] Это лучше всего, а для того, чтобы при этом не проигрывать в удобстве операции, полезно прикрепить малый (выверенный) анероид на самом высотомере. Тогда температура анероида будет с достаточностью определяться ртутным термометром высотомера.

Здесь m_i означают исправленные (по сличению с переносными часами) времена, например число минут от полудня (тот же счет от полудня или другого времени должно записывать и в журнале переносного прибора), а y_i — разочтенные высоты в метрах по формуле (XXVII), m_0 означает время, когда в пункте E кран неподвижного прибора заперт и когда высота $=0$. Этою таблицею легко затем воспользоваться и найти желаемую поправку x высоты z, вычисленной по наблюдениям в A и B, произведенным переносным прибором. Пусть наблюдение в A, где кран переносного прибора был заперт, было сделано во время m_a, а наблюдение в B во время m_b. По предшествующей таблице легко найти соответственные этим переменам высоты y_a и y_b. Если эти величины равны, то поправка $x=0$, т. е. разочтенная по наблюдениям высота z не должна быть поправлена по времени или, иначе сказать, в промежуток времени при переходе из A в B барометрическое давление не изменилось в данной местности на определенной высоте пункта E. Если же за это время произошло изменение давления, то величины y_a и y_b будут не одинаковы и в величину z должно ввести поправку. Если за это время давление возросло, то y_a будет больше y_b, разность $y_a—y_b$ будет величиною положительною. Во время m_b давление в B будет больше, чем во время m_a, следовательно вычисленная величина z будет меньше настоящей величины Z, выражающей разность высот $B—A$, на величину такую же $y_a—y_b$, а потому:

$$Z=z+y_a-y_b \quad \ldots\ldots\ldots \quad \text{(XXIX)}$$

Вообще истинная разность высот Z мест A и B найдется из равенства

$$Z=z+x,$$

где z есть высота, найденная, не обращая внимания на время (по формуле XXVII) по наблюдениям, сделанным с одним прибором, запертым в A и наблюденным в B; величина же x есть поправка этой высоты, сообразно перемене давления от времени m_a наблюдения в A до времени m_b наблюдения в B и очевидно, что:

$$x=y_a-y_b.$$

Когда все нивелирование производится одним высотомером и нет наблюдений в одном месте E, тогда в пункт A (или в какой другой) должно возвратиться после наблюдения в B и сделать опять полный отчет и найти величину z_a, отвечающую перемене времени. Пусть первое наблюдение в A сделано во время m_0, наблюдение в B во время m_1, второе наблюдение в A во время m_2 и пусть найденная по наблюдению высота, взяв данные для m_0 и m_1, будет z, а изменение по времени, найден-

ное по сравнении наблюдений m_0 и m_2, будет y, где z и y вычислены по (XXVII). Истинная высота B над A будет:

$$Z = z + x = z - y\frac{m_1 - m_0}{m_2 - m_0},$$

где x есть искомая поправка, которую найдем, считая перемену давлений пропорциональной времени (во время m_0 в A, $y_a = 0$, во время m_2 она $= y$; требуется найти y_b и взять по (XXIX) $x = y_a - y_b$, а потому:

$$y : y_b = (m_2 - m_0) : (m_1 - m_0),$$

откуда

$$x = -y_b = -y\frac{m_1 - m_0}{m_2 - m_0} = -(m_1 - m_0)\frac{y}{m_2 - m_0} \quad . \; . \; (XXX)$$

Если разность времени $m_1 - m_0$ равна разности времени $m_2 - m_1$, т. е. если наблюдение в B сделано в среднее время между двумя наблюдениями в A (а также и тогда, когда перемена давлений, т. е. y очень мала), то можно принять $x = \frac{1}{2}y$.[1]

Замечу здесь, что допущения, делаемые при нахождении поправки x, относящейся к времени, не могут повлечь за собою заметных погрешностей только при следующих условиях: a) промежутки времен должны быть кратки, b) расстояния пунктов не велики, c) изменения атмосферных давлений не быстры (нет бури и скорых перемен в направлении ветра), d) высоты незначительны и e) температура прибора и атмосферы мало различаются и изменяются. При этих условиях, обычных при нивелировании высотомером, нельзя опасаться погрешностей от поправки, вводимой на время, но все-таки лучше по возможности сокращать времена и повторять наблюдения, если желательно иметь значительную уверенность в результате.

---

[1] Для объяснения предшествующих приемов заметим только следующее (предполагая, что остальное сами читатели выяснят себе подробными расчетами). Для нахождения истинной высоты Z должно иметь в A и B единовременные наблюдения давлений. Если во время m_0 в A было давление H_0 (мм ртутного столба при 0°), а во время m_2 давление было $H_0 + \frac{y \cdot e}{13.6}$, где y имеет вышеобъясненное значение, e есть вес куб. метра воздуха в кг, 13.6 вес куб. метра ртути в кг, деленный на 1 000 — ибо выражение дано в миллиметрах), то во время m_1 давление в A было (считая изменение давления пропорциональным времени) равно $H_1 = H_0 + \frac{m_1 - m_0}{m_2 - m_0}\frac{y \cdot e}{13.6}$. В это время в B давление было $H_2 = H_0 - \frac{z \cdot e}{13.6}$, следовательно разность давлений в B и A во время m_1 была равна $H_2 - H_1 = \frac{e}{13.6}\left(z + y\frac{m_1 - m_0}{m_2 - m_0}\right)$ в миллиметрах ртути, а потому разность высот (стр. 131) $Z = 0 - z_2 = -\frac{13.6}{e}(H_2 - H_1) = z - y\frac{m_1 - m_0}{m_2 - m_0}$, как и принято выше.

Так как от 10 ч. утра до 8 ч. дня (между средними наибольшими и наименьшими показаниями барометра) барометрические изменения обыкновенно наиболее быстры,[1] но тогда зато они и наиболее правильны, то поэтому нет возможности предпочитать одни часы дня другим для правильности поправки x, относящейся ко времени.

Для записи данных, полученных с высотомером, полезно иметь особый журнал, левые страницы которого будут содержать данные, собранные на местах наблюдения, а правые страницы результат расчета. При этом прилагаем примерный образец такого журнала (стр. 182), предполагая, что наблюдения ведены при помощи одного высотомера, которого постоянные суть:

$\Delta = 0.8471 - 0.00065\ T$,

$\frac{v}{V} = 0.0000082$,

$q = 0.0202$, следовательно 29 $q = 0.5858$.

Поправка термометра $T = -0.^{\circ}3$.

Поправка часов $+7.3$ мин.[2]

Поправки анероида $= +5.7 - 0.15\ T$,

а нивелирование производится, исходя из места A, лежащего между двумя точками B и C, высоты которых требуется определить.

Для расчета найдем прежде всего истинные времена, температуры и давления по показаниям часов, ртутного термометра и анероида (графы c, d и g). Эти числа находятся, придавая к наблюденным величинам соответственные поправки. Исправленные показания составляют величины T и H, входящие в формулы для расчета. Такие величины и вписаны в соответственные графы правой страницы журнала (184). Так как в пункте C нет наблюдения над анероидом, то взято среднее исправленное давление 751.7 в пункте A и по нему определено давление, указанное высотомером, руководствуясь формулою (XX), которая дает, что:

$$H_2 = H_1 - \left(\frac{\Delta}{13{\cdot}6} + \frac{H_1}{2}\,\frac{v}{V}\right)(m_1 + n_1 - m_2 - n_2) -$$

$$- H_1\,\frac{0.00363}{1 + kT_1}\,q\,(t_1 - t_2).$$

---

[1] Они едва достигают в среднем (освобожденном от местных и частных вариаций) в наших широтах 1 мм ртути на 5 часов или на 1 час 3 мм нефти. Максимум отвечает 9—11 ч. дня и ночи, минимум 3—4 ч. дня и ночи.

[2] По сравнению с другими часами, принятыми за норму. В примере, где одни часы и один прибор, — эта поправка не нужна.

Левая страница журнала

Данные [1]

a Нумер наблюдения по порядку	b Признаки пункта наблюдения	c Время	d Показания ртутного термометра	e Показание манометра $m + n$	f Дифференциальный термометр	g Показание анероида	h Состояние погоды
1	A. От крайнего северного межевого столба дачи на расстоянии 5 саж. к югу, камень булыжный	Июня 10 1874 г. пополудни 2 ч. 17 м.	16.°7	— + — = 400 [2]	472.1	748.6	Небо облачно, время сухое
2	B. На вершине холма к востоку от A, на расстоянии от него 242 саж. у края леса, где вколочен кол № 35 . . .	2 ч. 28 м.	16.°9	73.1 + 274.1 = 347.2	475.2	744.0	
3	B. —	2 ч. 35 м.	16.°8	72.3 + 272.7 = 345.0	477.1	744.9	
4	A. (при обратном ходе)	2 ч. 46 м.	17.°1	94.3 + 295.2 = 389.5	481.5	718.7	
5	C. На запад от A, в расстоянии 135 саж., у пруда, где кол № 39	2 ч. 53 м.	17.°5	107.0 + 308.3 = 415.3	483.2	—	
6	C. —	2 ч. 57 м.	17.°4	106.8 + 308.0 = 414.8	484.0	—	
7	A. (при возвращении)	3 ч. 05 м.	17.°5	92.1 + 293.1 [3] = 385.2	485.0	748.3	

[1] Данные эти взяты не из действительных наблюдений, а составлены для примера.

[2] Такая запись показывает, что в пункте A кран прибора заперт. При этом нет нужды записывать показание манометра, сумма отчетов всегда будет = 400. Если бы нижняя часть манометра была расширена (в шар или т. п.), то отчет манометра мог бы давать грубое указание температуры прибора, но подобное устройство мало удобно. Если отчет был точен, температура постоянна и калибер манометра постоянен, то разность отчетов, произведенных на двух его ветвях, была бы числом постоянным.

[3] В подлиннике „193.1". (*Прим. ред.*)

В нашем частном случае $H_1=751.7$, среднее значение m_1+n_1, судя по данным для А № 4 и 7=387.3, а среднее значение m_2+n_2 (для С) по № 5 и 6=415.0, средние величины $t_1=483.3$; $t_2=483.6$, $T_1=17°.0$; а потому величина H_2 или давление в С= =753.6, что и внесено в таблицу расчета.

По истинным величинам H и T рассчитываются затем для каждого пункта значения величины Q, которые показывают число куб. метров, занятых килограммом воздуха, для чего служат таблицы, помещенные далее на стр. 189 в 6-м приложении. В нашем частном случае относительную влажность примем равною 30%, т. е. возьмем 1-ю из упомянутых таблиц, ибо летом, днем, в жаркое время влажность редко превышает 50%. Найденные величины вписаны в 6-м столбце правой страницы журнала.[1]

Затем в 7-м столбце даны значения K, рассчитанные по данным для прибора:

$$K=0.8471-0.00065\ T+H\cdot 6.8\cdot 0.0000082.$$

В дальнейшем расчете можно с полным правом принять K за постоянную=0.878, ибо все разности не превышают 0.0002 от этой величины.

В следующем 8-м столбце даны высоты z, считая высоту в наблюдении № 1=0, а потому, рассчитывая z по (XXVII), должно брать значение Q среднее для № 1 и того нумера, для которого делается расчет, значение m_2+n_2 должно брать из строки соответственного нумера, t_1 есть показание дифференциального термометра в № 1, а t_2 в соответственном нумере. Так, для расчета z, относящегося к № 2, имеем:

$$Q=\frac{0.8310+0.8362}{2}=0.834 \text{ (достаточно брать 3 децимали);}$$

$$400-m_2-n_2=400-347.2=52.8;$$

$$29\,q\,(t_1-t_2)=0.5858\,(472.1-475.2)=-1.82.$$

Так как для нашего частного случая:

$$z=0.8780\,Q\,(400-m_2-n_2)+0.5858\,(t_1+t_2),$$

то для № 2 значение

$$z=+38.66-1.82=+36.84.$$

Подобным образом разочтены z и для всех остальных нумеров и внесены в 8-й столбец.

---

[1] Можно брать средние давления и средние температуры воздуха, но от этого расчет не упрощается.

В этом случае при расчете не приняты во внимание изменения давления по времени, но они выражены в метрах для пункта А. Так как для него получено:

	№ 1	№ 4	№ 7	
Время $c=$	0	29	48	минут,
$y=$	0	$+2.16$	$+3.25$	

то значение y для него со временем возрастает, что и можно выразить, считая изменение пропорциональным времени. Для промежутка от № 1 до № 4 $\frac{y}{c}=\frac{2.16-0}{29-0}=+0.074$, для пространства времени от № 4 до № 7 $\frac{y}{c}=\frac{3.25-2.16}{48-29}=+0.057$.

Поэтому первое частное служит для нахождения высоты в промежуток времени от № 1 до № 4, ибо показывает, что

$$x=y_a-y_b=0-c\,0.074=-c\,0.074,$$

где x есть поправка на время (XXX), $c=m_1-m_0$ в (XXX), т. е. время того наблюдения, которое исправляется, а коэффициент $0.074=\frac{y}{m_2-m_0}$ по обозначению, примененному в формуле (XXX). Так найдены поправки для № 2 и 3, вписанные в 9-й столбец. Поправка x для № 5 и 6 слагается из высоты y, найденной для А в 29 минут времени $+(c-29)\,0.057$, следовательно здесь:

$$x=-[2.16+(c-29)\,0.057].$$

Приложив x к z, получим значения Z истинных высот над А. Эти величины вписаны в 10-ю графу расчета.

Она показывает, что в среднем:

Возвышение пункта В над А $=+36.0$ м
" " С " " $=-20.4$ "

Правая страница журнала

Расчет

a Нумер	*b* Признак пункта	*c* Время от запора крана мин.	*T* Истинная температура °Ц.	*H* Давление исправленное	*Q* Значение по табл. стр. 189	*K*	*z* и *y* По № 1	*x* Поправки по времени	*Z* Высоты над А в м
1	A	0	16.4	751.8	0.8310	0.8781	0	—	0
2	B	11	16.6	747.2	0.8362	0.8780	+36.84	—0.81	+36.03
3	B	18	16.5	748.1	0.8350	0.8780	+37.30	—1.33	+35.97
4	A	29	16.8	751.9	0.8321	0.8778	+ 2.16	—	0
5	C	36	17.2	753.6	0.8316	0.8779	—17.66	—2.56	—20.22
6	C	40	17.1	753.6	0.8313	0.8779	—17.77	—2.79	—20.56
7	A	48	17.2	751.4	0.8338	0.8778	+ 3.25	—3.25	0
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Фиг. 1.

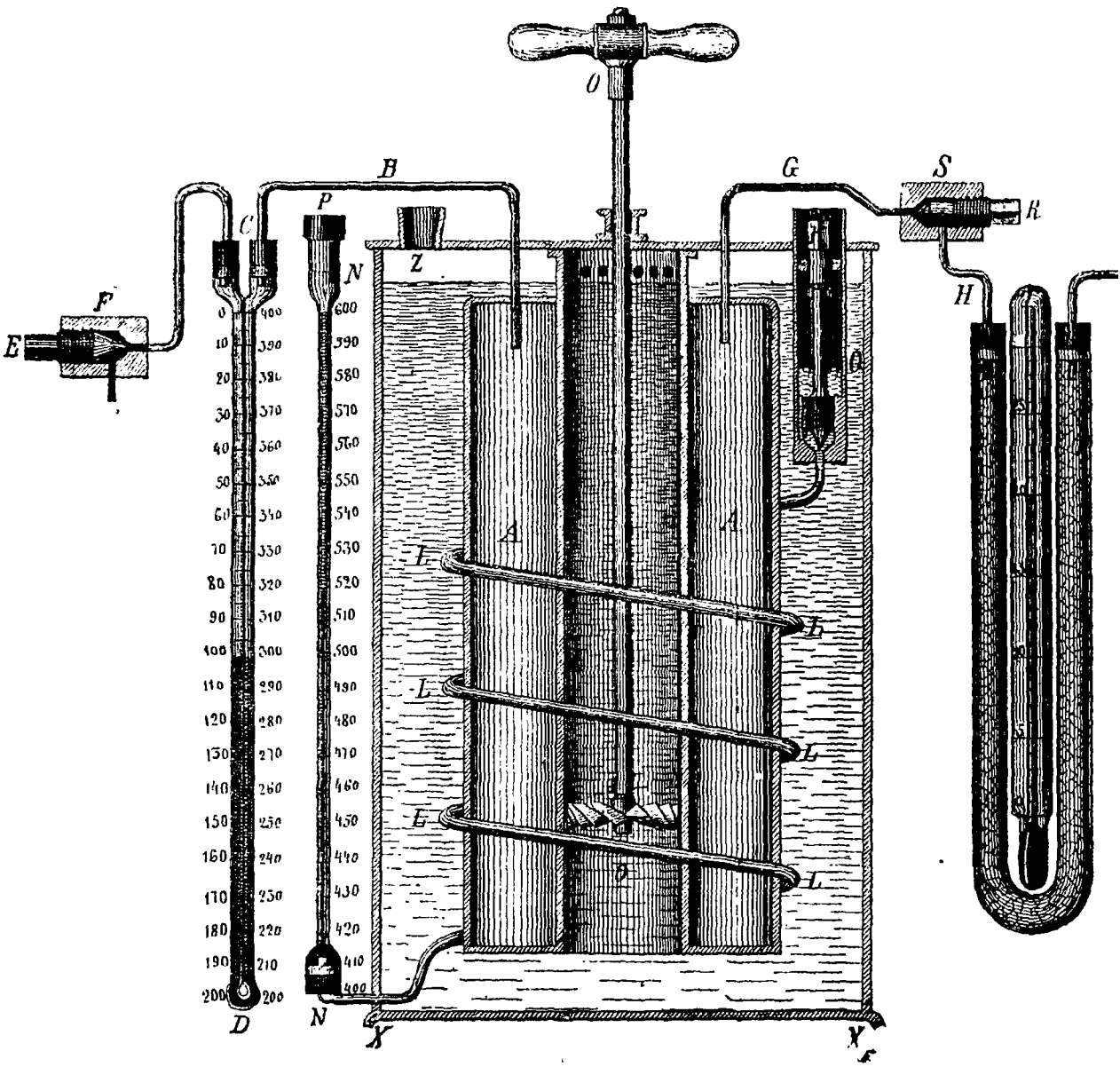
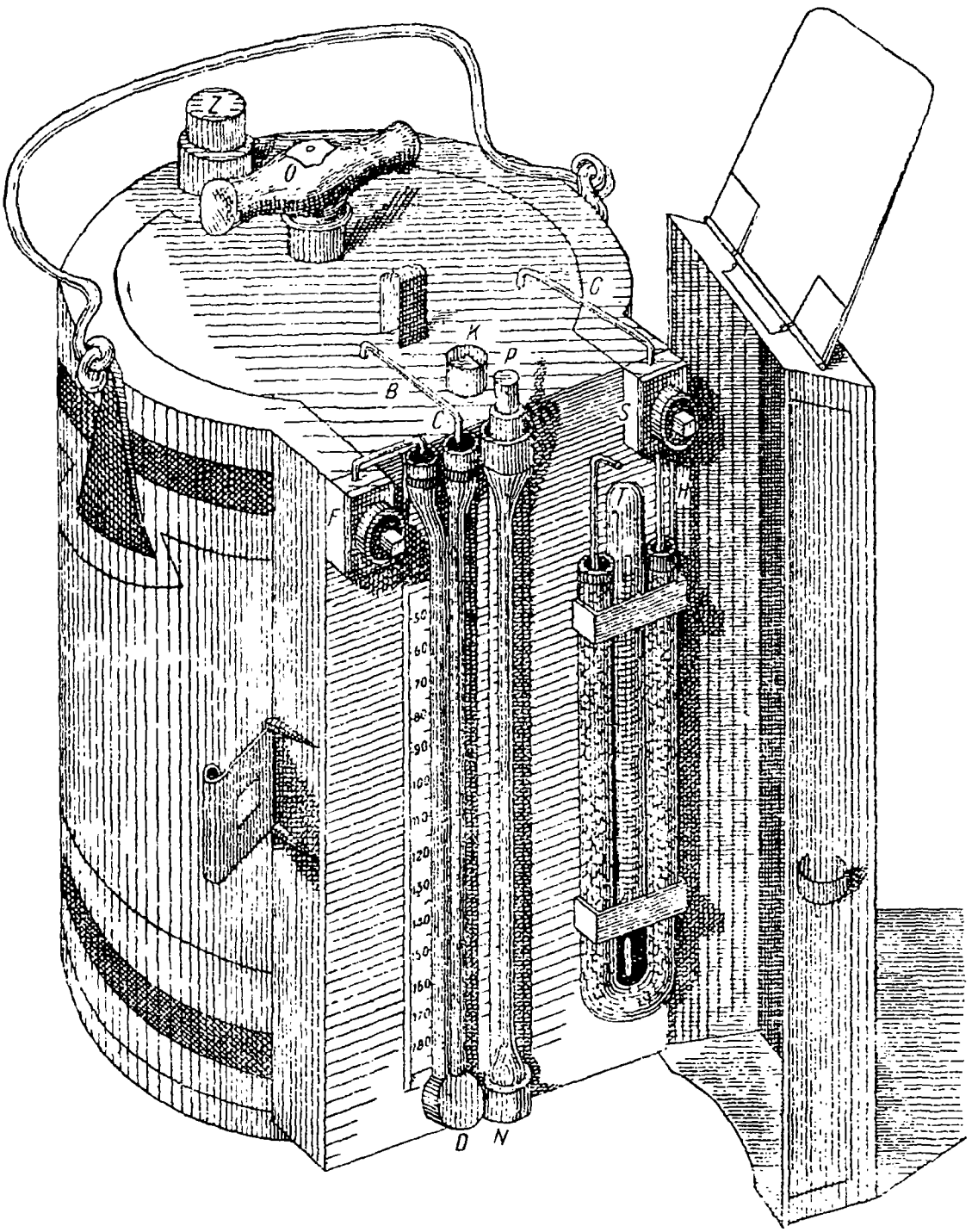


Схема высотомера
(1/2 натуральной величины)

Фиг. 2.



Высот мер Менделеева.

Лит. Н. Лапинга на углу Псковской ул. д. № 10—15.

Это можно выразить в журнале условно под знаками $\frac{B}{A}$ и $\frac{C}{A}$. Здесь же приведем значения в саженях, ибо 1 м = = 0.4673 саж., а затем можно вывести высоты пунктов A, B и C над какою-либо другою точкою. Так, если дана высота C над прудом = +0.82 саж., то найдем, что высота A над прудом = = +10.35 саж., а высота B над прудом = +27.17 саж.

Прибавление 5. *Испытание высотомера генеральным штабом в Финляндии*

Военно-топографический отдел генерального штаба весною 1875 г. устроил под наблюдением М. А. Савицкого несколько высотомеров для испытания применимости их к нивелированию. Летом того же года в Финляндии, а именно близ Гельсингфорса, полковники генерального штаба А. Г. Эрнфельд и Д. Д. Обломиевский произвели такое испытание, и по обязательности М. А. Савицкого я узнал результаты этой работы, которая подробно будет описана в статье Д. Д. Обломиевского в „Записках военно-топографического отдела".

Способ наблюдения состоял в следующем: близ Гельсингфорса есть гора Тёле, высота которой определена прямым нивелированием, и угломерным прибором с надлежащею точностью. Несколько других пунктов хорошо известны по такому же нивелированию. Высота горы 20.44 саж., более высоты остальных 19 пунктов, служащих для сличения. Все определения высот дифференциальным барометром делались или при помощи первоначального знания показаний прибора на горе и в основном пункте (далее этот способ назван относительным), или при помощи наблюдения метеорологических приборов (этот род определений назван далее прямым). В том и другом случае данные эти служили для определения плотностей воздуха. Прибор, служивший в работе, был один, но зато наблюдения делались всегда при подъеме и при спуске. Эти последние однако мало разнились одно от другого, когда вводились все должные поправки: на изменение давления по времени и на температуру по дифференциальному термометру. Вот пример:

Истинная высота одной из точек = 13.29 саж.

	Подъем	Спуск	
Наблюдения 19 августа дали . . .	13.89	13.27	Определения сделаны по способу относительному
„ 19 „ „ . . .	13.24	13.34	
„ 23 „ „ . . .	13.10	13.10	

Для вывода взяты средние из данных, полученных при спуске и подъеме. Вот на р. данные для трех пунктов:

		Пункт № 18	Пункт № 19	Пункт № 20
		в саженях		
Высоты мест		2.87	10.16	20.44
Высоты по высотомеру, способ относительный	24 авг.	3.06	10.10	—
	25 авг.	3.05	10.45	—
Высоты по высотомеру, способ прямой	23 авг.	—	—	20.26
	24 авг.	3.11	10.17	20.68
	26 авг.	3.02	10.40	20.76

Средняя (квадратическая) разность каждого определения, сделанного высотомером, от определения, сделанного угломерным прибором или нивелиром, оказывается, по сделанным определениям, не превышающею

$$\pm 0.14 \text{ саж.},$$

что отвечает почти футу. Такую именно степень доверия к обычным определениям, сделанным высотомерами, я и ждал, описывая этот прибор. Должно притом заметить, что при описываемых исследованиях употреблены высотомеры с широким цилиндрическим, а не с трубчатым (*LL*, как в фиг. 1) резервуаром дифференциального термометра, что температуры вовсе не уравнивались и температурные изменения часто были очень велики, так что емкости капиллярной трубки термометра недоставало для указания происходящих перемен температуры при переходе (4 версты) от одного крайнего пункта до другого, а потому можно думать, что при устранении этого результат был бы еще лучше. Желательно было бы кроме того знать степень точности в определении высот, принятых за истинные, для окончательного суждения о степени погрешности, получаемой при пользовании высотомером как прибором для нивелирования.

Тщательность, с какою гг. Эрнфельд и Обломиевский сделали определения высот дифференциальным барометром, значительность произведенных опытных работ и незначительность замеченных уклонений, даже при первом употреблении прибора в работу,—дают уверенность в том, что высотомеру предстоит практическое применение. А то внимание, которое оказал генеральный штаб в своих представителях[1] к моему при-

[1] Он не только устроил опыты для проверки прибора, но и выслал летом 1875 г. высотомер на географическую выставку в Париж. На этой выставке за то присудили мне медаль. Следовало бы, по моему мнению, присудить ее гене-

бору и к делу, многими дискредитованному (ибо многие сомневаются в возможности применения каких бы то ни было барометров к точному определению малых высот), обязывают меня не только заявить мою личную признательность, но и громко высказать: пусть следуют примеру генерального штаба наши учено-технические ведомства, когда встречается новое научное применение; пусть испытают его, подвергнут точной оценке, а не держатся укоренившихся, рутинных понятий, если эти понятия не основываются на точном и подробном изучении предмета. Это замечание полезно особенно для таких случаев, когда не денежный интерес, а чистый вопрос научной истины есть двигатель предлагаемого нового применения. Если и получится ошибка, она здесь не ляжет тяжелым бременем ни на совести, ни на кармане.

Прибавление 6. *Значения множителя Q, входящего в уравнения (XXVII) и (XXIII), служащие для определения высот при помощи высотомера*

$$Q=\frac{7990}{13.596}\,\frac{1+kT}{H}\left(1+0.377\,\frac{h}{H}\right)=\frac{2.1652\,(271.4+T)}{H-0.377\,\frac{r}{100}f}.$$

Q есть объем, выраженный в куб. метрах, занимаемый одним килограммом такого воздуха, какой встречается около поверхности земли, когда высота барометра (имеющего температуру 0°) равна H мм, когда температура воздуха равна T градусам стоградусного (Цельсия) термометра и когда упругость водяного пара, находящегося в воздухе, $=h$ мм; k есть коэффициент расширения воздуха $=0.003684$ по определениям моим и Каяндера (см. Журнал Русск. Хим. и Физ. Общ., 1875 г., и отчеты Парижской академии, 1876 г.[1]); f есть наибольшая возможная упругость водяного пара, отвечающая температуре T, т. е. то значение, которое имела бы величина h, если бы воздух совершенно был насыщен паром ($r=100$), а r есть число процентов влажности, т. е. $h=f\frac{r}{100}$. Значения f даны на стр. 190.

Засим приведены значения величины Q в двух таблицах. В таблице первой—для очень сухой погоды, напр. летом около полудня в сухое время, когда можно считать, что процент

ральному штабу, ибо он не только выполнил и изучил высотомер, но и занялся им, несмотря ни на предубеждение, существующее против барометрической нивелировки, ни на то, что нивелировки, производимые нашим генеральным штабом, вообще отличаются особою, редкою точностью, недостижимою для высотомера.

[1] Сочинения, т. VI, 1939, стр. 214 — 218. *(Прим. ред.)*

влажности не превышает 30%. Во второй таблице даны величины Q для случая влажной, сырой погоды, когда относительная влажность равна 90%. Такой случай будет чаще по ночам и зимою, при дожде или снеге, чем днем и летом или при чистом небе. Из сравнения соответственных чисел обеих таблиц очевидно, что значительная погрешность в относительной влажности имеет ощутительное влияние только при высокой температуре. Так, напр., при $H=750$, $T=10°$ первая таблица дает число 0.8136, а вторая 0.8158, а при $T=30°$ в сухое время ($r=30\%$) $Q=0.8742$, а при сырой погоде ($r=90\%$) $Q=0.8826$. А потому при высокой температуре полезно, для точности результата, знать точно процент влажности. Если он известен, то можно пользоваться величинами $\frac{dQ}{dr}$ (=изменению величины Q при изменении величины r на 1%), данными в таблицах, для расчета соответственного значения Q. Так, если $T=20°$ и относительная влажность=70%, то должно к числу, взятому из первой таблицы, прибавить произведение из 70—30 на $\frac{dQ}{dr}$, которое для 20°, судя по таблицам, = 0.00009, т. е. прибавить 0.0036.

Подобным образом, значения $\frac{dQ}{dH}$, $\frac{dQ}{dT}$ и $\frac{dQ}{dr}$ дают возможность расчесть значения Q для давлений, температур и влажности всяких иных, кроме тех, которые даны в таблицах. Значение этих величин есть:

$\frac{dQ}{dH}$ показывает изменение Q, отвечающее перемене давления на 1 мм. При *возрастании* давления Q *уменьшается*, а потому при $\frac{dQ}{dH}$ стоит знак — (минус).

$\frac{dQ}{dT}$ показывает изменение Q, соответствующее перемене температуры воздуха на 1° Ц. При возрастании температуры Q возрастает, а потому при числе $\frac{dQ}{dT}$ стоит знак + (плюс).

$\frac{dQ}{dr}$ показывает приращение Q, соответствующее приращению влажности на 1%.

Так, напр., если дано, что давление $H=742.7$ мм по ртутному барометру или по анероиду, показания которых исправлены во всех отношениях (см. стр. 102—125), что температура воздуха (по исправленному показанию термометра в тени, вдали от почвы и наблюдателя) $T=16.5°$ Ц. и что влажность=80%, то, руководствуясь второю таблицею, определяется значение Q:

$$Q=0.8594-0.0030-0.0115-^{1}0.0008=0.8441.$$

---

[1] В подлиннике „=". *(Прим. ред.)*

Таблица 1

Значение Q для очень сухой погоды ($r = 30$; $h = 0.3\ f$)

	$T = -10°$ Ц.	0° Ц.	+10° Ц.	+20° Ц.	+30° Ц.	
$H = 690$	0.8206	0.8523	0.8844	0.9169	0.9517	$\frac{dQ}{dH} = \begin{cases} \text{от } -0.0015 \\ \text{до } -0.0011 \end{cases}$
700	0.8089	0.8402	0.8718	0.9038	0.9369	
710	0.7975	0.8283	0.8595	0.8910	0.9237	
720	0.7864	0.8168	0.8475	0.8786	0.9108	
730	0.7756	0.8056	0.8359	0.8665	0.8982	

$$\frac{dQ}{dT} = \begin{cases} \text{от } +0.0031 & +0.0032 & +0.0033 & +0.0034 & +0.0035 \\ \text{до } +0.0027 & +0.0028 & +0.0029 & +0.0030 & +0.0031 \end{cases}$$

$$\frac{dQ}{dr} = +0.00001 \quad +0.00002 \quad +0.00005 \quad +0.00009 \quad +0.00016$$

$H = 740$	0.7651	0.7947	0.8246	0.8548	0.8860	$\frac{dQ}{dH} = \begin{cases} \text{от } -0.0012 \\ \text{до } -0.0009 \end{cases}$
750	0.7550	0.7841	0.8136	0.8434	0.8742	
760	0.7450	0.7737	0.8029	0.8322	0.8626	
770	0.7353	0.7637	0.7924	0.8214	0.8513	
780	0.7259	0.7539	0.7822	0.8108	0.8404	

Таблица 2

Значение Q для очень сырой погоды ($r = 90$; $h = 0.9\ f$)

	$T = -10°$ Ц.	0° Ц.	+10° Ц.	+20° Ц.	+30° Ц.	
$H = 690$	0.8212	0.8536	0.8871	0.9222	0.9605	$\frac{dQ}{dH} = \begin{cases} \text{от } -0.0014 \\ \text{до } -0.0011 \end{cases}$
700	0.8094	0.8414	0.8744	0.9089	0.9466	
710	0.7980	0.8295	0.8620	0.8960	0.9331	
720	0.7870	0.8180	0.8500	0.8834	0.9199	
730	0.7761	0.8068[1]	0.8383	0.8712	0.9071	

$$\frac{dQ}{dT} = \begin{cases} \text{от } +0.0032 & +0.0033 & +0.0034 & +0.0037 & +0.0040 \\ \text{до } +0.0028 & +0.0029 & +0.0030 & +0.0032 & +0.0035 \end{cases}$$

$$\frac{dQ}{dr} = +0.00001 \quad +0.00002 \quad +0.00005 \quad +0.00009 \quad +0.00016$$

$H = 740$	0.7656	0.7958	0.8269	0.8594	0.8947	$\frac{dQ}{dH} = \begin{cases} \text{от } -0.0012 \\ \text{до } -0.0010 \end{cases}$
750	0.7554	0.7852	0.8158	0.8478	0.8826	
760	0.7455	0.7748	0.8051	0.8366	0.8708	
770	0.7358	0.7648	0.7946	0.8256	0.8593	
780	0.7263	0.7549	0.7843	0.8250	0.8482	

[1] В подлиннике „8086“. (*Прим. ред.*)

Наибольшая упругость водяного пара (f) в миллиметрах ртутного столба (при 0°), по данным Реньо

$T =$	−30°	−29°	−28°	−27°	−26°	−25°	−24°	−23°	−22°	−24°Ц
$f =$	0.386	0.424	0.464	0.508	0.555	0.605	0.660	0.719	0.783	0.853 мм
$\frac{df}{dT} =$ [1]	0.036	0.039	0.042	0.046	0.048	0.053	0.057	0.061	0.067	0.072 мм
$T =$	−20°	−19°	−18°	−17°	−16°	−15°	−14°	−13°	−12°	−11°Ц
$f =$	0.927	1.008	1.095	1.187	1.290	1.400	1.518	1.646	1.783	1.933 мм
$\frac{df}{dT} =$	0.08	0.08	0.09	0.10	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15 мм
$T =$	−10°	−9°	−8°	−7°	−6°	−5°	−4°	−8°	−2°	−1°Ц
$f =$	2.078	2.261	2.456	2.666	2.890	3.131	3.387	3.662	3.955	4.267 мм
$\frac{df}{dT} =$	0.18	0.19	0.20	0.21	0.23	0.25	0.27	0.29	0.30	0.32 мм
$T =$	0°	+1°	+2°	+3°	+4°	+5°	+6°	+7°	+8°	+9°Ц
$f =$	4.600	4.940	5.302	5.687	6.097	6.534	6.998	7.492	8.017	8.574 мм
$\frac{df}{dT} =$	0.33	0.35	0.38	0.40	0.42	0.45	0.48	0.51	0.54	0.57 мм
$T =$	+10°	+11°	+12°	+13°	+14°	+15°	+16°	+17°	+18°	+19°Ц
$f =$	9.165	9.792	10.457	11.162 [2]	11.906	12.699	13.535 [3]	14.421	15.357	16.346 мм
$\frac{df}{dT} =$	0.61	0.64	0.68	0.72	0.77	0.81	0.86	0.91	0.96	1.01 мм
$T =$	+20°	+21°	+22°	+23°	+24°	+25°	+26°	+ 7°	+28°	+29°Ц
$f =$	17.391	18.495	19.659	20.888	22.184	23.550	24.988	26.505	28.101	29.782 мм
$\frac{df}{dT} =$	1.07	1.13	1.19	1.27	1.33	1.40	1.48	1.56	1.63	1.72 мм

[1] Изменение упругости на один градус. Величины эти дают возможность рассчитывать промежуточные значения f.

[2] В подлиннике „11.062". (*Прим. ред.*)

[3] В подлиннике „13.635". (*Прим. ред.*)

Если непосредственно расчесть по вышеприведенной формуле значение Q для $H=742.7$, для $T=16.5$ и для $r=80\%$, то

$$h=\frac{r}{100}f=0.8\cdot 14.1=11.3;\quad Q=\frac{287.9}{738.4}2.1652=0\,8442.$$

Для применения высотомера достаточно знать Q с точностью трех десятичных, а потому таблицы дают его значение с достаточною точностью. Для того, чтобы знать Q с точностью большею (т. е. с погрешностью в 5 десятичной запятой) должно знать температуру, давление, влажность и напряжение тяжести с точностью, трудно достижимою. Значения Q, данные в таблицах, отвечают приблизительно широте места в 50 градусов.

Величина Q может быть применяема и во многих других расчетах, напр. во многих метеорологических задачах, при вопросах механической теории тепла, при взвешивании в воздухе и т. п.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие. Поводы для устройства дифференциального барометра и для составления предлагаемой книги. Предупреждение против у барометрического нивелирования. Применения дифференциального барометра к другим целям, особенно к метеорологическим 55

Введение. О разных способах нивелирования. Принцип барометрического нивелирования 61

Гипсометрические формулы. Основное уравнение в конечных разностях и дифференциальное (3). Зависимость веса воздуха от веса его в нормальных условиях, от давления и напряжения тяжести, от температуры и влажности. Зависимость между температурою и влажностью, с одной стороны, и между высотою места и давлением воздуха, с другой стороны. Вид основного дифференциального уравнения (6) и его интегрирование. Преобразование формулы при помощи разложения натурального логарифма в строку. Окончательное выражение (8). Барометрическое постоянное. Способы расчета высот. Логарифмический расчет и таблицы, его облегчающие. Формулы Лапласа и Бабине (12). Гипотезы, применяемые в гипсометрии, и способы для проверки гипотез. Данные для Женевы и С.-Бернара, Мизинга. Выводы относительно применимости гипсометрических формул. Причины, вероятно влияющие на уклонения. Неравенство давлений на одном уровне. Изменчивость в содержании кислорода в воздухе, по закону Дальтона. Влияние влажности. Убыль ее при подъеме. Следствия, из того выходящие. Проверка их на данных для Шомона и Невшателя. Определение малых высот барометрами. 67

Приемы для определения истинных давлений ртутными барометрами. Изучение шкалы. Поправки на температуру ртути. Чистота ртути. Определение поправки на упругость воздуха, находящегося в пустоте. Видоизменение, предлагаемое для переносных ртутных барометров. Поправки на капиллярность. Об определении температуры воздуха . . . 102

Прибавление 1. Способ Браве для определения толщины стен и внутреннего диаметра готового барометра 117

Прибавление 2. О депрессии ртути. Новые наблюдения, касающиеся этого предмета, сделанные г-м Иорданским и г-жею Гутковскою 119

Определение давлений анероидами. Выгоды и недостатки анероидов. Выбор. Проверка и применение анероидов 121

Основное начало устройства дифференциального барометра (высотомера). Для нивелирования должно точно знать разности давлений, а не их абсолютную величину. Способ определения перемены давлений

при помощи закона для упругости газов, при постоянной температуре, при переменном и постоянном объеме и при переменной температуре. Основная формула (20). Чувствительность прибора. Практические требования от прибора. Устройство высотомера и дифференциального термометра и объяснение рисунков. Разные сорты высотомеров 125

Применение гипсометрической формулы к определению высот с помощью высотомера. Гипсометрическая формула для малых высот (21). Комбинация ее с формулою для высотомера (23). Способы определения: плотности нефти в манометре, отчета на приборе, отношения $\frac{v}{V}$ емкостей манометра и резервуара для воздуха и значения делений на дифференциальном термометре. Постоянные прибора. Формула, служащая для определения высот (37). О возможной погрешности 143

Приемы нивелирования высотомерами и способы обращения с прибором. Применение одного или двух высотомеров. Пользование определенными заранее высотами. Предосторожности, которые должно соблюдать при наблюдении, перевозке, испытании, наполнении и поправке повреждений прибора 160

Прибавление 3. О температуре прибора. Необходимость близости температур атмосферного воздуха и прибора для применения формулы (27). Формула (28), наиболее общая и вышеприведенного условия не заключающая 173

Прибавление 4. О порядке наблюдений, о их записи и о расчете. Постоянные прибора. Переменные величины наблюдений. Поправки на время при одном и двух высотомерах. Расчет единовременных данных на двух пунктах. Пример журнала наблюдений и полный расчет примерных данных 176

Прибавление 5. Результаты применения высотомера к нивелированию около Гельсингфорса, произведенному полковниками генерального штаба г.г. Эрнфельдом и Обломиевским . . 185

Прибавление 6. Значения Q (объем, занимаемый килограммом воздуха) для очень сухой (30% влаги) и сырой (90% влаги) погоды . . 187

Прилагается таблица с 2 рисунками:

Фиг. 1. Схематический разрез высотомера обыкновенного устройства, ½ натур.

Фиг. 2. Вид высотомера, необлеченного деревянным ящиком.

Журнал Русского Химического Общества и Физического Общества 1876 г., т. VIII. отд. I, в. I, ч. физ. стр. 3

ВЫПИСКА

из протокола 32-го заседания Физического Общества

2-го декабря 1875-го года

6. Д. И. Менделеев сообщил о влиянии влажности на барометрическое давление. Так как в верхних слоях воздуха всегда содержание влажности менее того, которое должно быть для равновесия атмосферы,[1] то влажность нижних слоев постоянно стремится в верхние слои. По этому одному (и сверх того по другим известным и более разнообразным причинам) давление, показываемое барометром, не есть аэростатическое, а должно быть считаемо аэродинамическим. Гипсометрические формулы, основанные на допущении равновесия атмосферы, поэтому должны всегда давать в средних один род отступлений от действительности (обыкновенно утверждают противное, считая среднее из многих лет — действительности), хотя от изменения напряжения восходящего тока и получатся колебания в определенных высотах. Когда распределение влажности в слоях воздуха будет наиболее близко отвечать условию равновесия — средние числа должны дать высоту наиболее близкую к действительности. Все это подтверждается при рассмотрении многих существующих наблюдений, из которых особенно ясные результаты дают десятилетние средние числа для Шомона и Невшателя.

---

[1] См. сообщение г. М. в протоколе 4 ноября 1875 г. $f = f_0 \frac{H + 0.23H_1}{H_1 + 0.28H}$ или, по крайней мере $f = f_0 \frac{H}{H_0}$, где f_0 есть упругость пара на поверхности земли, где давление воздуха H_0, а f есть упругость паров там, где атм. давление $= H$.

1876. Это очень меня занимало, но опять я из-за других дел бросил довести эту работу до конца, а стоило бы.

101. Там же. Сообщено о выражениях климата тремя или двумя постоянными.[1]

[1] В „Списке печатных работ Д. И. Менделеева", напечатанном в ч. 8 Временника Главной палаты мер и весов, 1907, под №№ 92 и 94 значится: „О выражении годовых изменений температуры воздуха (Протоколы Варш. съезда русских естествоиспытателей, 1876)" и „Определение климата немногими постоянными величинами, 1876)". Отдельной работы № 94 не удалось нигде разыскать; как видно из нескольких слов Д. И. Менделеева, — это та же работа № 92. (*Прим. ред.*)

Протоколы секционных заседаний V съезда русских естествоиспытателей и врачей в Варшаве. Варшава. В типографии Кпола Ковалевского, Королевская улица № 23, 1876, стр. 5—v.

ПРИЛОЖЕНИЕ К ПРОТОКОЛУ

3-го заседания секции физики и физ. географии

4 (16) сентября 1876 г.

Д. И. Менделеев сообщил о выражении годовых изменений температуры воздуха. В наблюдаемых изменениях средней суточной температуры должно ясно отличать изменения климатические и погодные. Первые определяются непосредственным действием солнца на почву и воздух, они должны иметь годовой и другие солнечные периоды; вторые определяются направлением ветров. Между этими последними также могут быть периодические изменения, ибо ветры обладают годовою периодичностью. По этой причине в средних суточных температурах, полученных даже из большого числа лет, не будут устранены все погодные изменения, часть их может остаться.

Это видно из лучших многолетних данных по примеру из 60-летних парижских.

При общем возрастании температуры с половины января по июль здесь оказывается в первой половине февраля почти постоянная температура. О климатических изменениях температуры можно иметь теоретическое понятие на основании астрономического знания законов освещения в периоды года. Расчеты этого рода показывают в общих чертах согласие между изменениями освещения и изменениями температур на разных широтах, но вследствие местных условий на данной широте, при постоянном освещении, температурные изменения различны, а потому для нахождения климатических изменений температуры должно пока прибегнуть к эмпирическим формулам. Ныне метеорологи применяют для этого формулу Бесселя, стараясь с возможною точностью выразить все периодические изменения. Полного согласия с наблюдениями и при сложном виде формул (при многих по-

стоянных) не получается, а значительное согласие дает простая формула вида:

$$t = T - A\cos\frac{350}{365\cdot 25}(x - B),$$ [1]

где t есть температура в день x (считая в среднем 365.25 дней, от 1 января), T — средняя годовая температура, A — амплитуда годовых исчислений температуры в B день, соответствующий наименьшей температуре. Для 50-летних данных Гринвича, обработанных Глешером,[2] вычисляются: $T = 9.°48$ Ц., $A = 6.°95$, $B = 22.8$, вероятная погрешность суточной температуры $= \pm 0.°3$ Ц. Для Франкфурта на Майне (данные обработаны Грейсом) $T = 9.°56$; $A = 9.°90$; $B = 16.7$; вероятная погрешность $= \pm 0.°1$ Ц. Для Петербурга (месячные средние взяты от Вильда) $T = 3.°66$, $A = 13.°44$, $B = 20.7$; вероятная погрешность $= \pm 0.°4$ Ц. Полугодовой период небольших отступлений от формулы, замечаемый для многих мест Европы, можно считать за подобные изменения температуры, потому что для американских наблюдений нет и такого полугодового периода отступлений, как видно из данных, собранных в Торонто (в Канаде) и обработанных Себином. Здесь $T = 5.°48$, $A = 9.°84$, $B = 23.5$, погрешность $= \pm 0.°4$.

Таким образом, климатические изменения средних дневных температур определяются с достаточною точностью симметрическою кривою и тремя постоянными: T, A и B. Величина B мало изменяется в умеренном и холодном поясах Северного полушария. Она здесь близка к 20, т. е. низшая температура наступает около 20 января (нового стиля). Изменяемость T выражается годовыми изотермами. Величина же амплитуды A, возрастая от экватора к полюсу, в то же время и весьма ясно возрастает от морских берегов к центру суши; на восточных берегах континентов это изменение очень быстро, слабее на западных. Так, например, в Англии величина эта менее 7°, в Париже 8.°2, в Женеве 9.°6, в России, за малыми изъятиями южных окраин, более 10°, около Тобольска достигает 20° Ц., близ Якутска 30° Ц. Имея карту изотерм и изоамплитуд, можно с большою точностью знать среднюю температуру каждого дня в каждой местности, нанесенной на карту. С возвышением над уровнем моря A уменьшается. Нормальные температуры, определяемые формулою, дают возможность однообразного и более правильного, чем ныне, суждения о погодных изменениях температур. Погодные изменения температур суть отступления от нормальных.

---

[1] Подобное же простое выражение предлагал несколько лет тому назад американец Эверст.

[2] В подлиннике опечатка: „Тлешером". (*Прим. ред.*)

1876. Предисловие, писанное мною, содержит кое-что самостоятельное, меня тогда интересовавшее.

104. Мон. Метеорология или учение о погоде. Перев[од] Иорданского и Капустина. 1876. Предисловие и нек[оторые] добавления Д. Менделеева.

МОН
профессор университета в Христиании, директор Норвежского Метеорологического Института

МЕТЕОРОЛОГИЯ
ИЛИ
УЧЕНИЕ О ПОГОДЕ

С 24 картами и 34 рисунками

Перевод с немецкого оригинального издания 1875 года
Н. ИОРДАНСКОГО и Ф. КАПУСТИНА

Под редакцией и с дополнениями
Д. МЕНДЕЛЕЕВА

Сумма, которая может быть выручена от продажи этой книги, назначается на устройство большого аэростата и вообще на изучение метеорологических явлений верхних слоев атмосферы

САНКТПЕТЕРБУРГ
Типография Товарищества „Общественная Польза"
Большая Подъяческая, соб. д. № 39
1876

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ [1]

В последние десятки лет ни в одной отрасли точных знаний не произошло такого значительного развития, как в учении о погоде, т. е. в одной важной ветви метеорологии. Непосредственное влияние солнечных лучей на данную местность и близкие к ней места — определяет то, что называют *климатом*. Средние величины, составляющие вывод из многих наблюдений, производимых в местности, дают точное понятие о климате. Многие важные и давние результаты метеорологии относятся именно к климату. Совсем иное дело *погода*, в тесном смысле. Это — отступления от климата, от средних, относящихся к данному месту, дню и часу. Погода интересует иначе, чем климат. Всякий знает, что к полюсам идут страны более холодные, к экватору — жаркие, что ночью и днем, зимою и летом идет чередовая смена климата. Это прямое влияние солнца. Погода определяется ветром: воздух данной местности заменяется воздухом другой страны, — в данную местность приходит, так сказать, другой, чужой климат, — и это сопровождается некоторою совокупностью особых явлений, каковы бури и т. п. Учение о погоде есть учение новое. В прежней метеорологии его почти не рассматривали, законов погоды не знали. Всю метеорологию, поэтому, можно разделить на климатологию, т. е. учение о климате, и темпестологию или учение о погоде. Первая есть статика,

---

[1] В виду того, что предисловие и примечания Д. И. Менделеева не только характеризуют его как выдающегося геофизика своей эпохи, но и заключают мысли, многие из которых не потеряли значения и в настоящее время, мы перепечатываем здесь целиком „Предисловие к русскому изданию" и большинство примечаний. Опущены лишь имеющие чисто техническое значение по отношению к размещению материала в русском издании (примечания к стр. 70, 146 и 176) и дающие перевод в русские меры (примечания к стр. 103 и 225). Фразы из текста Мона приведены в квадратных скобках тогда, когда без них непонятен смысл примечания.

Тексту примечания предшествует номер страницы, где помещено оно или его начало. (*Прим. ред.*)

вторая динамика; первая предполагает некоторое установившееся равновесие, вторая рассматривает движение, существующее в атмосфере и в метеорологических элементах. Предлагаемая книга имеет главною задачею изложение учения о погоде. Климатология здесь средство, а не цель.

Предлагаемое сочинение норвежского метеоролога Мона, весьма много содействовавшего своими исследованиями успехам метеорологии, содержит почти популярное, элементарное, но строго научное и чрезвычайно обстоятельное изложение успехов, достигнутых в последнее время метеорологиею. Мону удалось, не вдаваясь в мельчайшие подробности, дать столь полную картину, что ее очерки рисуют не только состояние сведений о погоде в настоящее время, но и указывают на то, что следует еще сделать для того, чтобы начавшееся развитие знаний о погоде привело затем к полнейшему пониманию и верному предсказанию погоды. Некоторые главы сочинения Мона, а преимущественно первые, содержат сведения об элементах, определяющих погоду, о способах наблюдения и пользования ими для дальнейших выводов, в них содержится и климатология. Так, Мон рассматривает температуру, влажность, атмосферное давление, ветры и электрические и оптические явления атмосферы. Это элементы, из которых слагаются понятия о погоде и о климате и получается возможность судить об их изменении по разным часам дня, по временам года, по местностям на поверхности земли и по их взаимной друг с другом связи. Материалом для этих частей метеорологии Мону служили преимущественно работы Дове и Букана, его собственные исследования и метеорологические отчеты разных стран, ныне издающих ежегодно своды метеорологических наблюдений. Сложное учение о погоде излагается Моном в 6-й главе, составляющей центр и цель всей книги. Глава эта дает много ясных и отчетливых правил, выработанных изучением и дающих возможность предсказывать в данной местности состояние погоды на ближайшее время. Но здесь нет того утилитарного направления, которое чуждо чистой науке и которое ограничивается одними догматическими, сжатыми, для практики нужными правилами. Дается наука, а не одни приметы, требуется самостоятельное суждение, а не одно чтение. На этом-то отделе метеорологии, т. е. на учении о погоде, преимущественно и сосредоточены все усилия современных передовых метеорологов. Мон не вдается в другие, менее разработанные и более сомнительные обобщения, являющиеся у многих метеорологов, старается воздерживаться от смелых гипотез. О больших периодах погоды, содержащих в себе несколько лет и связанных с солнечными пятнами, о соотношении между погодою и магнитными явлениями, о связи между погодою и оптическими явлениями, а в особенности с рефракциею или прелом-

лением света, о климатологических изменениях с течением веков и о многих других общих вопросах метеорологии Мон вовсе не говорит, потому что он имеет задачу, совершенно определенную и ясно ограниченную, а именно: дать в руки наблюдателя, исследующего климат и затем погоду данной местности, средства для того, чтобы знать их и затем предсказывать на ближайшее время те перемены, которые в погоде могут быть.

Такая задача чрезвычайно важна для множества прямых практических целей. Не только все интересуются погодою, потому что зависят от нее, но и множество практических деятельностей находится в прямой, непосредственной связи с переменами погоды. Достаточно упомянуть в этом отношении два примера: мореплавателей и земледельцев; тем и другим прежде и ближе всего нужно знать состояние погоды в ближайшее, следующее за сим время. Врачи настолько же заинтересованы климатом, как и погодою.

Элементарность того изложения, которого держится Мон, сжатость и даже некоторая сухость его общих глав определяются краткостью всего сочинения. Эта краткость делает сочинение Мона чрезвычайно приятным для изучения. Не приходится здесь бросать страниц, наполненных цифрами, критическими соображениями и тому подобным содержанием многих метеорологий. Для чтения книги нужна подготовка в географии (карты поэтому без надписей) и в физике, но затем, хотя нет утомительных мелочей, все необходимое изложено с поразительною простотою, доступно. Мон не дает теории приборов, не входит в подробное описание разного рода поправок, для каждого метеорологического прибора необходимых, одним словом, не вступает в ту область, в которой преимущественно вращаются многие метеорологи. Но несмотря на эту краткость, книга Мона тем не менее настолько полна и содержательна, что всякий, знакомый с началами физики, будет в состоянии достигать с книгою Мона в руках тех целей, которыми задался автор. Мне хотелось сперва дополнить книгу Мона изложением элементарных сведений из физики и химии, необходимых для изучения погоды; но я увидел затем, что такие добавления нарушили бы общий план книги, значительно увеличили бы ее содержание, сделали бы ее учебником, а не настольною книгою практического человека, желающего узнать современное состояние учения о погоде. В виду этого, при переводе соблюдены по возможности с пунктуальною точностью сжатость подлинника и его слог.

То, что добавлено мною, помещено в выносках (с подписью *Ред.*). Здесь я также не хотел вдаваться в подробности, а только делал намеки и некоторые указания, имея в виду заинтересовать читателя указанием на некоторые вопросы, рождающиеся при чтении книги Мона.

Книга Мона явилась сперва в норвежском оригинале, в августе 1874 г., затем в августе 1875 г. Неймайер в Берлине перевел ее на немецкий язык. Это немецкое издание—оригинальное, снабжено новыми картами и т. п. Наш перевод сделан с этого немецкого издания, просмотренного автором. В немецком переводе сохранены оригинальные примеры, которые относятся преимущественно к Скандинавскому полуострову. Мне не хотелось нарушить и этой стороны книги Мона, преимущественно по двум причинам: во-первых, потому, что свойства скандинавского климата близки во многом к свойствам климата многих частей России, а во-вторых, потому что разнообразия в климате разных областей России так велики, что, восполняя книгу Мона примерами из местностей России, нужно было бы вместо одного-двух примеров приводить множество.

Весьма богатый запас метеорологических данных уже имеется в России. Капитальный вклад в этом отношении составляет сочинение К. С. Веселовского „О климате России"; акад. Купфер, а затем акад. Вильд, руководители метеорологических наблюдений, производимых в России, заведуя главною метеорологическою обсерваториею в России, издавали и издают сборники сведений о климате России. В настоящее время являются в этом отношении ежегодно сборники, называемые „Летопись главной физической обсерватории" и „Метеорологический сборник". В этом последнем, однако, большинство статей на иностранных языках, хотя между деятелями метеорологии и считается немало чисто русских имен. Из этих последних в особенности выдаются имена гг. Воейкова и Рыкачева. Особые условия, в которых находится большая часть России, обширность суши, отсутствие гор и удаленность океана придают климату России особый характер, чрезвычайно поучительный во многих отношениях. Хотя давно уже разрабатывается учение о климате России, но все еще наши сведения об этом предмете первостепенной важности для такой страны, как Россия, где земледелие составляет главную отрасль промышленности, не вполне отвечают современным потребностям. Желать можно многого. Выполнение, конечно, трудно, потребует расходов чрезвычайных, но зато — надо думать, что ни в какой другой стране развитие метеорологии не принесет таких плодов, как у нас. Предсказание погоды у нас наиболее мыслимо по той причине, что однообразие атмосферных условий распределяется на весьма обширные области. Нельзя не высказать здесь желания, чтобы земства, уже начавшие интересоваться метеорологическими наблюдениями,[1] приняли и эту область под свое покровительство. Организация метеорологических станций в данной губернии

[1] Еще недавно Аткарское земство обратилось по этому поводу в наше Физическое общество.

не только посодействует изучению общих сведений о ходе у нас погоды, но и несомненно, с книгою Мона в руках, даст возможность предвидеть на ближайшее время ход изменения погоды в данной местности. Издавая книгу Мона, я и желаю дать в руки наших практиков необходимое руководство. Бесцельно, для какого-то абстракта, люди работают мало, неохотно, а многим кажется, что знание климата и составляет такой абстракт, в некотором роде научную прихоть, роскошь. Для того, чтобы работать для одной науки, нужно обладать не только знанием целей науки, но и некоторою силою воли. Другое дело, когда с известным способом действия, требуемым наукою, связываются непосредственные, каждому видимые, осязательные результаты. Ныне метеорологические данные, добытые на рассеянных по России метеорологических станциях, концентрируются и рассматриваются в нашем центральном метеорологическом учреждении. Таких центров в сущности должно быть много; тогда и только тогда привьется к жизни научное развитие метеорологии. Конечно, много остается еще сделать в области метеорологии; для ее движения еще нужны и метеорологические учреждения, которыми бы публиковались все наблюдения, в данной стране производящиеся. В этом отношении организация метеорологических наблюдений в России достигла желательного совершенства. Прикасаясь к чистому знанию, метеорологи должны помогать ему, должны содействовать его развитию, но это не должно, конечно, отнимать от метеорологии ее прямых практических применений к определению погоды в данной местности. Итак, мне кажется, что наилучшая организация метеорологических наблюдений достигнется тогда, когда наблюдения данной местности, во-первых, будут служить непосредственно для прямых практических польз окрестных жителей, дадут им в руки средство не только узнать климат, но и определять погоду. Затем, во-вторых, местные наблюдения должны быть организованы так, чтобы они могли служить для дальнейших успехов в развитии метеорологического учения. Для правильного достижения этой цели при производстве метеорологических наблюдений наша главная метеорологическая обсерватория издает особые наставления для производства метеорологических наблюдений. В-третьих, там, где наблюдения произведены с надлежащею полнотою, они не должны оставаться под спудом; они должны рано или поздно сделаться всеобщим достоянием чрез публикацию. В летописях метеорологической обсерватории помещаются и должны помещаться своды всех хороших метеорологических наблюдений, делаемых в России. Таким путем достигнется и местный интерес, и производство метеорологических наблюдений не пропадет для науки.

Интерес к этому предмету уже существует и, надо думать, станет развиваться. В этом отношении можно полагать даже,

что близко время, когда метеорологические интересы станут на первый план не только у многих практиков, но и в среде людей, занимающихся точными науками. Судьба метеорологии весьма характерна. Всякий близок к общему знакомству с погодой; народы всюду имеют различного рода приметы, характеризующие изменения погоды; практики, близкие к погоде, земледельцы и моряки составили себе целый кодекс таких практических примет. К этому примешались стремления обобщать некоторые приметы суеверием, оттого часто совершенно игнорируют практическое знакомство с погодою. Точные сведения о погоде начинаются с тех пор, когда вместо прямых впечатлений чувства начали собирать измеряемые метеорологические данные или метеорологические элементы в научном смысле; когда стали наблюдать температуру, влажность, давление, направление и силу ветров, изменения хода облаков, их строение, изменения температуры на разных высотах, стали определять температуру моря и т. д. Наука начинается здесь, как и везде, с тех пор, как начинают измерять; точная наука немыслима без меры. Данных оказывается чрезвычайно много; но затем новый труд состоит в том, чтобы охватить их, разобраться и найти общее начало, управляющее полученными числами. Для этого имеются два пути: дедуктивный, математический способ рассмотрения хода явлений и эмпирический способ нахождения численных законов, управляющих ходом явления. Для первого приема необходимо знание некоторых уже известных законов; нечто допускается, как несомненное, и затем выводятся из него следствия. Для пути эмпирического необходимо знание тех поправок мелочных обстоятельств, которые прикрывают иногда сущность явления. Тот и другой из этих научных путей давно применяются в метеорологии. Геометры много содействовали правильности развития метеорологических знаний, но ныне этим предметом они почти совсем не занимаются. Не подлежит сомнению, что близко время, когда метеорологические вопросы займут почетное место в ряду задач, рассматриваемых геометрами. Воздушные течения, вихреобразные движения в атмосфере, путь движения воздушной частицы в атмосферном океане, степень связи движения земли и ее воздушной оболочки — все это и множество других еще почти не тронутых задач достойно полного внимания дедуктивной области естествознания. Частица воздуха, находящаяся в данный момент и на данном месте около поверхности земли, не пребывает здесь а движется вследствие огромного количества влияний, действующих на нее и заставляющих ее перемещаться.

Каждая частица воздуха, судя по современным понятиям о природе газообразных тел, принимается оживотворенною собственным поступательным движением чрезвычайно большой быстроты; это движение определяет упругость, диффузию и раз-

ные другие свойства газа. Затем при суточном вращении земли вместе с последнею вращается и слой воздуха, так сказать, прилипший к ее поверхности, подобно тому как вместе с качающимся маятником движется некоторый слой воздуха, приставший к его чечевице. Такое движение частей атмосферы будет ослабляться по мере уменьшения давления, и в верхних слоях атмосферы можно ожидать слоя разреженного воздуха, не участвующего в суточном движении. В последнее время этому нашлось фактическое подтверждение в своде тех данных, которые собраны по отношению к северному сиянию. Северное сияние представляет магнито-электрическое явление, происходящее в верхних разреженных слоях атмосферы. Оказывается, что та область атмосферы, в которой происходит северное сияние, не участвует в суточном вращении земли, а северное сияние с такою же быстротою проходит через меридианы мест, с какою движется поверхность земли, т. е. северное сияние, так сказать, стоит и под ним проходят разные места земной поверхности. Частица воздуха, далее, подчиняется влиянию нагревания, сообщаемого ей земною поверхностью; от этого быстрота движения частицы возрастает; попадая в слои, более удаленные от поверхности, давление уменьшается, температура понижается. Приобретенное направление движения уклоняется вследствие центробежной силы и различия скоростей вращения в разных широтах. Получив данное направление движения, частица воздуха стремится двигаться по прямой линии и уже по этому одному из нижних слоев атмосферы при дальнейшем движении восходит в более верхние слои воздуха. Если прибавить сюда то участие влажности, которое определяет главным образом большинство метеорологических изменений, то получится весьма сложная, но к разрешению возможная задача динамики. Не подлежит ни малейшему сомнению, что ею станут заниматься, и тогда уяснится многое в общем ходе метеорологических явлений.

Что касается до климатологического вывода из собранных метеорологических данных, т. е. до выводов из них эмпирических законностей, то в этом отношении сделано уже чрезвычайно многое, но предвидится и далее множество задач, требующих усиленного внимания ученых. В тропических странах метеорологические явления чрезвычайно правильны и, если нарушаются, то такими резкими отступлениями, как бури и т. п., а потому там зародились первые сведения об эмпирических законах изменения погоды. Достаточно в этом отношении упомянуть имена Гумбольдта и Буссенго, чтобы указать на то, что в свое время задачами этого рода интересовались в высокой мере. Открытие двух maximum'ов и двух minimum'ов в изменении атмосферного давления под тропиками в свое время играло роль важнейшего двигателя метеорологии. Изучение тропических бурь привело

к понятию о вихрях, составляющих причину бурь. Учение о вихрях составляет ныне центр, около которого группируются все сведения о погоде. Особенное же внимание обратили метеорологи на изучение периодических изменений, замечаемых в метеорологических данных повсюду. Всякий знает, что в течение дня существует известная последовательность в изменении погоды, напр. температуры, облачности и тому подобных данных, определяющих погоду. Годовой период погоды составляет первое элементарнейшее сведение об этом предмете. Для того, чтобы точно выражать периодические изменения в погоде, выводят эмпирические формулы для различных периодов, а именно, для периодов дня, года и многих лет. Для годового периода средняя температура дня или 5 дней составляет единицу, для дневного периода средняя температура отдельных часов составляет такую же единицу. Зная те изменения, которым подвергается средняя дневная температура в течение года, а затем зная те периодические изменения, которым подвергается температура дня в различные его часы, мы получаем очевидную возможность охватить картину изменений в такой мере, что в данный час года можно сказать — какое должно быть метеорологическое данное в известном месте, климат которого определен и изучен с надлежащею полнотою. Не много таких местностей, где бы в этом отношении были достаточно полно изучены периоды дня и года, и в этом отношении труды Дове многое внесли в метеорологию, а работы Плантамура над климатом Женевы дали образцы, которым следуют ныне всюду. Способ расчета средних метеорологических данных, определяющих периодические изменения, применяется в метеорологии со времен Лапласа и Бесселя и представляет несомненный шаг науки вперед. Замечу здесь, однако, что в этом отношении следуют пути, могущему подлежать дальнейшему улучшению. Та периодическая функция Лапласа — Бесселя

$$y = a + b \sin\left(B + \frac{2\pi}{m} x\right) + c \sin\left(C + \frac{4\pi}{m} x\right) + \ldots\ldots$$

(где y есть число, относящееся ко времени x, когда явления повторяются в период времени длиною m и где $a, b, c \ldots, B$ $C \ldots$ суть постоянные), по которой обыкновенно производятся расчеты средних метеорологических данных, должна быть, по моему мнению, изменена во многих отношениях. Если дело идет о том, чтобы выразить формулою, кратко, общий ход изменения какого-либо метеорологического явления (напр. температуры, давления, влажности) в данный период (год, день), то достаточны формулы, гораздо более простые, чем те, которые применяются ныне. Так, напр., для выражения годового периода изменения температуры в данной местности можно применять с достаточною степенью точности во многих случаях кривую, которую можно

назвать синусверсоидою, а именно такую, которая выражается формулою:

$$y = A + B\left[1 - \cos 360\,\frac{x+c}{m}\right]$$

или

$$y = a + b\cos\frac{360}{m}\left[x+c\right].$$

Об этой кривой весьма легко составить каждому практическое понятие, если взять цилиндр, навернуть на него бумагу и разделить эту бумагу (окружность цилиндра выразит всю длину периода m) по окружности цилиндра на 12 равных частей, отвечающих 12 месяцам, затем срезать цилиндр не перпендикулярно к его оси, а косвенно. Развернув бумагу, мы получим кривую линию — синусверсоиду. 12 вертикальных линий, нанесенных на бумаге, будут отвечать средним температурам данных чисел месяцев. Будет один minimum, лежащий около января, и один maximum, соответствующий июлю. Такая кривая определится вполне, если только будут даны положения трех, друг от друга удаленных точек на поверхности цилиндра. Выражая подобным образом периодическую функцию метеорологических явлений, мы получаем ту выгоду, что кратко, в трех (a, b, c) числах концентрируем понятие о некотором метеорологическом данном.[1]

Если же при метеорологических расчетах периодических функций не довольствоваться крупным, общим понятием о периодических изменениях, а требовать от такого рода функций точного, детального сведения о ходе изменений некоторого метеорологического данного, то необходимо еще более усложнить расчет, чем то делается ныне по формуле Лапласа — Бесселя. Достаточно указать на тот пример, который находится в „Schweizerische meteorologische Beobachtungen" (1873) в статье Бильвиллера, где сведены для многих мест Швейцарии термометрические данные за 10 лет, с 1864 по 1873 год. Та кривая, которая отвечает периодической функции, очевидно, не удовлетворяет фактам, относящимся к 5-дневным наблюдениям температуры. Так, во всех исследованных местах в марте были температуры ниже, чем дает кривая; а в июле во всех этих местах температура была выше, чем дает кривая; в августе же и сентябре есть быстрые изменения в температуре, а именно ее возрастания, совершенно одинаковые всюду. Точно то же замечается и в декабре около 20-го числа. Что же, спрашивается, достигается при сглаживании тех всюду находящихся отступлений, которые уничтожаются при

[1] Применяя так способ для расчета метеорологических данных России, я получил некоторые обобщения, кажущиеся мне не лишенными интереса, а потому предполагаю публиковать об этом предмете со временем особую статью.

помощи применения известного определенного способа расчета? Будь отступления местны, временны, частны, они не были бы одинаковыми во всех местах, а это однообразие отступлений указывает на то, что в природе дела есть причины, которые необходимо выразить формулами. Мне кажется, что для расчетов периодических данных метеорологии должно применять затем такую формулу, в которую бы сразу входили и периоды дня, и периоды года. Это будет волнообразная кривая, общая ось маленьких волн которой изгибается по периодам года. Притом, такие кривые необходимо иметь для совершенно определенных лет, для того, чтобы узнать, по крайней мере со временем, сколько изменяется из года в год от 11-летнего (или другого многолетнего) периода до другого 11-летнего — каждое метеорологическое данное во многих местах. Вообще, я думаю, что и в том направлении, которому следуют ныне многие и по которому из метеорологических данных рассчитываются периодические функции, — и в этом направлении предстоит при дальнейшей разработке метеорологических данных не мало дальнейших улучшений. Особенно настоятельно здесь ясно отличать погоду от климата.

Еще в большей мере можно ждать от метеорологии дальнейших успехов по отношению к связи метеорологических явлений в разных местах друг с другом. Ныне в Америке и в Европе издаются метеорологические атласы, выражающие ежедневный ход изменения метеорологических явлений, особенно сведения о давлениях, ветре и облачности. Гофмейер, директор датского метеорологического института, публикует ежедневные синоптические карты, в которых означаются многие метеорологические данные для Европы; но главную задачу карт составляют данные для барометрических давлений, т. е. карты преимущественно выражают изобары, или линии распределения давлений на поверхности земли, считая ее ровною, как поверхность океана. Бейсбаллот в Голландии дал тот закон, развитие которого Буканом в Ирландии сделало возможным новый прогресс в метеорологии. Закон этот состоит в том, что ветер направляется от тех мест, где давление наибольшее, в те места, где оно наименьшее; воздух движется по поверхности земли от того места, где на него действует большее давление, подобно тому как воздух, сдавленный в кузнечных мехах, стремится выйти чрез отверстие меха в пространство, где давление меньше. Так и воздух земли направляется в то место, где давление наименьшее, там он восходит и распределяется в верхних слоях атмосферы, попадает, значит, опять в то место, где давление больше, и таким образом происходит круговорот в атмосфере. Этим круговоротом переносится воздух одного места в другое, климат одной страны становится другим. Данному времени и месту отвечает, напр., сырой, жаркий климат, приходящий делает погоду сухою, холодною. Течением воздуха

захватываются водяные пары из тех мест, где давление больше, и приносятся в те места, где давление меньше; и если они холоднее, часть паров сгущается, оттого в этих местах образуются осадки, является облачность. В этих понятиях лежит несомненный задаток точного и правильного понимания погоды и вообще метеорологических процессов. Центры наибольших или наименьших давлений перемещаются по поверхности земли, и это отлично видно на картах изобар. Ими несомненно определяются многие условия погоды с положительностью, потому что они определяют ветер, существующий на поверхности земли, а ветер есть такое данное, которое преимущественно определяет изменение погоды. Не будь ветра, будь замкнутое пространство, в котором была бы тишина, установились бы некоторые правильные периоды, и тогда бы можно было периодические функции применять к такому замкнутому пространству с полным совершенством, потому что метеорологические процессы тогда определялись бы напряжением солнечного света и углами падения его лучей на поверхность земли, был бы переменный климат, понятия о погоде как вариации климата не существовало бы. Но то, что нагрелось в данной местности, то, что охладилось в известном месте земли чрез подъем в верхние слои атмосферы, то перемещается по земле, приходит в другую страну и определяет ее погоду. Следовательно, с одной стороны, надо знать, как влияет солнце на метеорологические данные в данной местности, а с другой стороны — какая часть воздуха и с какою быстротою переходит с одного места земли на другое. Изобары дают в последнем отношении указания драгоценные. Не подлежит, однако, сомнению, что кроме разности давлений, перемещение воздушных масс по поверхности земли совершается и под другими, всюду встречающимися влияниями. Для понимания дела необходимо знать те пути, которые имеет воздух. Склоны местности, русла и бассейны рек влияют на токи воздуха, как влияют они на ток воды. Затем надо знать, как и куда направляется воздух, поднявшийся в пространстве с наименьшим давлением в верхних слоях атмосферы; а в этом последнем отношении наши сведения еще сравнительно слабы. Чтобы дать понятие о том, что не под влиянием одной только разности давлений может совершаться перемещение воздуха, приведу пример движения жидкостей; его наглядность и простота дают возможность выразить вкратце основную мою мысль. Представим два сосуда, между собою сообщенные внизу. Это нижнее сообщение представляет земную поверхность. Ток жидкости в этой сообщающейся ветви отвечает ветру. Можно заставить перемещаться жидкость из одного сосуда в другой, т. е. производить ток или ветер, производя различные давления в разных сосудах. Очевидно, что, увеличивая давление в одном сосуде, мы заставим жидкость переливаться из этого

сосуда в другой, где давление меньшее, до тех пор, пока не произойдет уравнения давлений, пока разность высот жидкостей не будет отвечать разности давлений; это соответствует изобарам и закону Бейсбаллота. Но когда слагается такое представление, имеется в виду жидкость неизменной плотности, всюду однообразная; воздух не таков, его плотность под влиянием температуры, влажности и давления изменяется. Представим же себе теперь в наших двух сосудах две жидкости неодинаковой плотности. Легко достичь того, что давление в обоих сосудах на дно будет одно и то же; для этого только высоты жидкостей должны быть обратно пропорциональны их плотностям. Если в одном сосуде будет ртуть, а в другом вода, то в первом высота будет в 13.6 меньше, чем во втором. Равенство давлений будет, изобары ничего не покажут, а движение жидкости произойдет. Оно будет зависеть от разности плотностей: тяжелая жидкость потечет по дну сосуда, где она содержится, в тот, где ее нет. Это будет ветер, определяемый разностью плотностей и не зависящий от разности давлений. Такие ветры несомненно существуют; береговые бризы это доказывают: ночью и днем они сменяются, дуют с берега на море и обратно, а давление на берегу и на море одно и то же; барометром нельзя наблюдать причины ветра, а ветер есть. Изобары, значит, не одни определяют его направление, а следовательно и изменение погоды. Днем суша нагревается сильнее, чем море, воздух теплее и при том же давлении легче, а потому по поверхности земли должен существовать морской ветер; на некоторой высоте должен существовать обратный ветер; давление остается постоянным. Ночью над морем воздух теплее, над сушей холоднее, оттого произойдет ток берегового ветра, не зависящий от перемены давления, а на некоторой высоте должен быть морской ветер, отвечающий нижнему береговому. Все это можно формулировать следующим образом: ветры, переносящие воздух по поверхности земли, определяются, во-первых, разностью давлений, существующих на одинаковых уровнях, а во-вторых — разностью плотностей воздуха, на тех же уровнях находящегося. Мне кажется, что применение этого второго закона, определяющего направление ветров, должно содействовать дальнейшему уяснению некоторых частностей в распределении погоды. Внимание многих метеорологов ныне вполне поглощено изобарами, другие причины ветра и погоды поэтому почти упускаются из вида. Мне хотелось сделать здесь намек на эту сторону вопроса о погоде, тем более, что устроенный мною прибор (дифференциальный барометр, или высотомер) дает возможность скоро определять плотность воздуха как метеорологическое данное.

Изучение восходящих и нисходящих токов в атмосфере и движений воздуха не только на земной поверхности, но и в высо-

ких ее слоях, должно дать ключ к решению множества метеорологических задач. Производя наши метеорологические наблюдения на поверхности земли, мы остаемся в неведении о том, что совершается в массе воздуха, от нас удаленной и помещающейся в воздушном слое, облекающем землю. Образование и движение облаков, изменение рефракции по периодам дня, изменения в ходе температуры на разных высотах в разные времена года и дня, существование постоянных ветров от maximum'a давления к области minimum'a, постоянство пассатных ветров, количество испаряющейся и осаждающейся влаги в разных странах и в разные периоды года и многие другие метеорологические явления свидетельствуют, что в явлениях погоды принимают громадное участие не только ветры, движущиеся горизонтально по поверхности земли, но и восходящие и нисходящие токи. Ныне ограничиваются в метеорологии почти исключительно сведениями о движении воздуха по поверхности земли, а сведения о восходящих и нисходящих токах, а также и о тех токах, которые существуют в верхних слоях, ничтожно малы. Знаем только четверть пути воздуха, а три четверти его неизвестны или же сведения о них чрезвычайно слабы, измерений мало, а потому и знаний мало. К ближайшим практическим задачам метеорологии поэтому относится изучение этих обстоятельств. В этом отношении метеорологические обсерватории весьма много страдают; мало есть наблюдений даже над ходом облаков, над их угловою скоростью, над их высотою и направлением движения и над изменениями температуры на разных высотах. Пикте в своих наблюдениях, сделанных (в Женеве) на высоком шесте, затем Глешер (в Лондоне) на привязанном аэростате, а в последнее время Вильд на сигнале около Пулкова многократно указывают на то, что ход изменения температуры с возрастанием высоты, даже при небольшом поднятии, претерпевает известного рода изменения, сообразные с периодами года и дня. Так, напр., данные Вильда указывают на то, что в мае, июне, июле, августе и сентябре в 8 ч. утра и в 1 ч. дня температура тех слоев воздуха, которые возвышаются над данною поверхностью на 15—30 м. ниже, чем температура близ земной поверхности; в 8 же ч. вечера замечается явление обратное: при таком малом поднятии температура в 8 ч. вечера всегда выше, чем на земной поверхности. Это возрастание температуры достигало в мае 1873 г. средним числом до 0.°2 на высоте 26 м против того места, которое удалено было от земной поверхности на 2 м; в июне эта разность в 1873 г. достигала 0.°3, в июле и августе возрастание температуры достигает даже 0.°6, а в сентябре оно равняется даже 0.°7; тогда как при той же разности высот утром и около полудня температура убывает примерно от 0.3 до 0.°5. Собирание подобного рода данных, а в особенности изучение

движения облаков, определение их угловой и абсолютной скорости, а также и воздушные восхождения на аэростатах должны взойти важнейшими элементами в изучении погоды, должны осветить многие стороны этого предмета. Разработка этих задач уже занимает многих. Издавая предлагаемое сочинение, я имею в виду приобрести через продажу и распространение его средства, необходимые для устройства аэростата, назначаемого для восхождения в верхние слои атмосферы. Там лаборатория погоды, там образуются облака, там они движутся и там редко помещаются измерительные приборы. Наблюдения на высоких горах не могут дать того, что могут дать аэростатические восхождения. Для изучения климата в России, стране континентальной, в общих чертах плоской, чрезвычайно много можно ждать результатов от многочисленных наблюдений, производимых на аэростатах. Придет время, когда аэростат сделается таким же постоянным орудием метеоролога, каким ныне стал барометр. Потребность в этом в особенности настоятельна ныне, когда почти нет никаких подлинных сведений о движении воздушных масс в верхних слоях атмосферы.

В заключение этого предисловия, в котором я хотел выразить некоторые мысли, занимающие меня теперь, я решаюсь указать на те роды наблюдений на земной поверхности, которые рисуются в моем уме как средства для дальнейшего точного изучения погоды. Мне кажется, что для этого необходимо к собираемым ныне метеорологическим данным присовокупить прежде всего сведения о *рефракции* или о преломлении света, проходящего через воздух, на земной поверхности. Геометры и геодезисты изучают земную рефракцию как средство, необходимое для исправления наблюдений, производимых при помощи точных угловых измерительных приборов. Известно, что земная рефракция представляет многие, ныне еще не обобщенные особенности. В бо́льшую часть дня видимые изображения предметов не спокойны, предмет кажется в трубку, особенно снабженную нитями, колеблющимся; точных наблюдений делать нельзя. Для наблюдения избираются особые часы дня, когда изображения покойны. Саблер в 1839 г. после наблюдений, сделанных на Кавказе, выразил земную рефракцию при помощи двучлена, состоящего из постоянной величины, не зависящей от расстояния, и из произведения коэффициента рефракции (0.088) на угол вертикалей, зависящий от расстояния. Саблер нашел далее, что постоянная величина изменяется вместе с изменением покойности изображения. При очень непокойном изображении значение постоянной величины найдено Саблером равным —40″. Даже тогда, когда изображение почти покойно, но предшествует полному покою, значение постоянной величины все-таки остается отрицательным и достигает до —9″. Когда изображение совершенно покойно, тогда нет

этой постоянной величины или она равна нулю. Затем, после времени покойного изображения наступает такое, когда изображение опять кажется колеблющимся, но тогда значение постоянной, не зависящей от расстояния, положительно и при изображении почти покойном оно достигает +7″, а при очень неспокойном изображении оно опять достигает до +40″, так что замечаются уклонения от +40 до —40″ или достигают 1.′5 в тех условиях, которые были у Саблера. Наблюдения, сделанные в то же время А. Н. Савичем, подтверждают в некотором отношении выводы Саблера. Практики-геодезисты ловят момент покойного изображения для произведения точнейших наблюдений; они игнорируют те данные, которые собраны при неспокойных изображениях. Метеорологи должны изучить это дело, потому что особенности рефракции представляют некоторую периодическую функцию, зависящую несомненно от восходящих и нисходящих токов, от перемены давления, и очень может быть, что при разных азимутах в одной горизонтальной плоскости найдутся различные уклонения в рефракции, определяющиеся теми разностями давления, которые имеются в разных местах, лежащих на разных частях горизонта. Такого рода наблюдения над рефракцией чрезвычайно просты, хотя и требуют внимательности и точных инструментов. Полковник генерального штаба М. А. Савицкий доставил мне данные, собранные им в Пулкове над земною рефракцией в разные дни и часы относительно некоторых определенных пунктов. Различия в положении пунктов, видимых из Пулкова, оказались достигающими минуты, т. е. подлежат точному измерению, в особенности микрометрическому. Для наблюдений, значит, нужна труба, снабженная микрометром и точным уровнем, и затем знание расстояния и высоты удаленных видимых предметов в разных частях горизонта. Если будут произведены систематические наблюдения над рефракцией, то, надо думать, чрез то получится новое метеорологическое данное и, что всего важнее, касающееся огромного слоя воздуха, через который проникает от данного предмета луч света до наблюдателя. Можно думать даже, что барометрический градиент (§ 276) находится в некоторой связи с рефракцией.

Другое метеорологическое данное, которым должно было бы руководствоваться и нахождение которого также не сложно, т. е. легко производится, — это *определение плотности воздуха* в данной местности. Его можно произвести, не только рассчитывая по температуре, давлению и влажности величины плотности, но также и при помощи поднятия на разные высоты такого чувствительного барометра, который бы мог показывать изменения давления при небольшом поднятии. Об этом предмете я не распространяюсь здесь, потому что указал на него в моем сочинении „О барометрическом нивелировании и применении для него

высотомера". Если бы такого рода наблюдения производились и притом на разных высотах, то наши сведения о воздушных течениях и силах, их направляющих, несомненно получили бы более твердую, чем ныне, опору.

Особенный интерес представляют из метеорологических данных, легко наблюдаемых, *движения облаков* и *определение их угловых и абсолютных скоростей.* Определение движения облаков, находящихся в зените, можно производить с большою легкостью; для этого можно руководствоваться некоторым неподвижным предметом и смотреть на перемещение облаков, обращая глаза кверху. Это неудобное положение наблюдателя может быть легко устранено при помощи зеркальной поверхности; лучше всего, мне кажется, для этой цели может служить поверхность ртути, налитой в сосуде. Устроив над этой поверхностью на некотором расстоянии сетку, состоящую из линий, имеющих направление по странам света, легко можно сделать подобного рода наблюдения очень точными. Подобный прибор может дать и угловую скорость движения облаков. Гораздо затруднительнее определение скорости облаков, находящихся в некотором удалении от зенита. Для этой последней цели, мне кажется, должно воспользоваться шарообразными зеркальными поверхностями; часть такой поверхности легко получить с надлежащею степенью точности. Отраженное и уменьшенное в ней изображение, вследствие своей сжатости, гораздо лучше подлежит точным измерениям, чем непосредственно видимые массы облаков, лишенные резких очертаний. А то правильное соотношение, которое существует между положением изображения, видимого на такой шаровой зеркальной поверхности, и истинным положением предмета на своде небесном, делает возможным применение шарообразной отражающей поверхности к точным измерениям явлений на своде небесном. Этот прием, если будет у меня на то время, я подвергну дальнейшим испытаниям и дальнейшему развитию. Но и ныне уже имеется немало способов для определения высоты, направления и абсолютной скорости облаков; в особенности достойны внимания те способы, которые основываются на наблюдениях движения тени облаков по земной поверхности. Они приложимы к производству точных наблюдений в тех случаях, когда место наблюдения лежит на некоторой высоте и план видимой местности точно известен. Я предполагаю издать со временем статью, в которой рассмотрю различные способы определения данных для облаков, и в ней постараюсь сделать обзор существующих сведений об облаках, играющих громадную роль в определении погоды.

Затем нельзя не высказать желания, чтобы единовременно с печатанием метеорологических отчетов издавались и отчеты о состоянии растительности в разных местностях. Это многократно

предлагали и ранее; не мешает напоминать, потому что забывают делать это. Полезно также производить систематические определения уровня грунтовых вод (связь с болезнями) и уровня воды в реках и озерах (связь с количеством вод). Эти данные свяжут метеорологию с сведениями общеинтересными и важными для хозяйства. Эти наблюдения может делать другое лицо, а не метеоролог-наблюдатель. Необходимо выработать программу наблюдений этого рода. Ее давали не раз, но часто заявляются требования, трудно исполнимые.

Обычные метеорологические данные, собираемые на земной поверхности, состоят из следующих элементов: 1) температура воздуха в тени и на некотором удалении от земной поверхности и зданий; 2) степень влажности воздуха, проще всего определяемая по психрометру, т. е. по влажному термометру, находящемуся рядом с сухим термометром; 3) барометрическое давление, определяемое ртутными барометрами или анероидами; 4) направление ветра; 5) его давление или скорость; 6) наибольшая и наименьшая температура, определяемая по максимальному и минимальному термометру; 7) степень покрытия неба облаками или облачность; 8) количества осадков или высота выпавшего на землю слоя воды. Непрерывное наблюдение над метеорологическими приборами на малых станциях невозможно, потому что для этого требуются дорогие регистрирующие или самопишущие приборы; необходимо периодическое записывание через известный промежуток времени всех данных. В таком записывании всегда будет индивидуальный характер; наблюдатель может опоздать временем, может сделать неточный отчет и т. п. Из-за этого страдают многие метеорологические данные в значительной мере. Для устранения этого недостатка метеорологических наблюдений мне представляется полезным *заменить наблюдателя фотографическим прибором*. Представим себе, что в некотором месте собраны все метеорологические приборы. Поместим их шкалы примерно в одной плоскости; в той же плоскости повесим календарь с отрывающимися листками, указывающими день наблюдения. Повесим тут же часы, показывающие момент, когда фотографические изображения сняты. Если организуются предполагаемые аэростатические восхождения — я устрою для них такой прибор. Он очень облегчит производство точных наблюдений. Если на определенном расстоянии от той плоскости, в которой находятся шкалы и часы, поместим фотографический прибор, то все дело наблюдателя будет состоять в том, чтобы чрез некоторые промежутки времени помещать в камер-обскуру прибора заготовленную фотографическую пластинку. Ныне это дело выработано в совершенстве, не требуется ни особого знания, ни какой-либо специальной подготовки, требуется только открыть объектив и через некоторый промежуток времени

закрыть его, затем вынуть пластинку и поместить ее в определенную жидкость, так что самый грубый исследователь может без всякого труда и с самою малою потерею времени произвести всю эту операцию. На краткий промежуток времени, необходимый для снятия фотографии, легко и ночью сделать надлежащее освещение, хотя бы магнием. Организация наблюдений будет при этом и дешевле и несомненно точнее. Изображение, полученное на фотографической пластинке, дает все необходимые материалы для вывода точнейших данных, которые только могут дать употребленные в дело приборы. Пусть там не будет точного барометра, анероид совершенно достаточен, но только, чтобы были известны его поправки по отношению к нормальному ртутному барометру; пусть термометр будет обыкновенный, но только, чтобы он был изучен. Можно, конечно, устроить такого рода наблюдения и таким образом, чтобы все метеорологические инструменты имели свои шкалы внутри теплого помещения; так, например, шарик термометра может быть в свободном воздухе, а шкала его в теплом помещении; указатели силы и направления ветра могут при помощи простых приспособлений быть приведены также в ту плоскость, с которой снимается фотографическое изображение. Поправка часов также должна быть известна. При предлагаемом мною способе наблюдения вывод данных из полученных фотографических пластинок будет представлять уже кабинетную работу, для которой потребуются люди подготовленные; но ведение самых метеорологических наблюдений может быть при этом поручено людям или очень занятым, не могущим отдавать наблюдениям много времени, или людям таким, которые по степени развития своего не представляют гарантии для ведения отчетливых метеорологических наблюдений. Завести часы, поставить пластинку и промыть ее может всякий, и на фотографической пластинке будет известно, в какой час и какую минуту сделано было данное метеорологическое наблюдение. Легко будет затем привести наблюденные величины к определенным часам дня. Организация в этом виде метеорологических наблюдений мне кажется наиболее приличною для получения действительно точных метеорологических данных. Метеорологические данные, полученные описанным путем, могут положительно служить точкою опоры как для суждения о погоде в данной местности, так и для дальнейшего движения науки.

Как в книге Мона, так и вообще при метеорологических наблюдениях в последнее время применяются исключительно французские меры, а потому я привожу здесь соотношение между этими последними и обычными в России мерами.

Метр=0.4688 сажени=22.5 вершкам. Сажень=2.134 метра=2134 миллиметрам. Килограмм или кило=2.442 русск. фунта. Русск. фунт=0.410 кило =410 грамм. В таблицах IV и VI (поме-

щенных в конце книги) дано превращение дюймов в миллиметры. Температуры выражаются в градусах Цельсия или стоградусного термометра. На таблице I, прилагаемой в конце книги, указано соотношение между градусами Цельсия и Реомюра. Барометрические давления приведены в миллиметрах ртутного столба; 1 миллиметр давления отвечает давлению 1.3596 граммов на квадратный сантиметр; давление в 760 миллиметров соответствует давлению 10 333 кило на квадратный метр. Соотношение между давлениями, выраженными в миллиметрах и английских дюймах, приведено в конце книги в табл. IV и VI. Немецкая или географическая миля = 7.420 метров = $^1/_{15}$ доли градуса экватора. Морская миля, в которой выражаются некоторые расстояния, равна 1′ по дуге меридиана или равняется 1852 метрам.

Числа, приведенные в книге Мона, все относятся к новому стилю, т. е. представляют числа нашего стиля +12 дней.

Апрель 1876 г. *Д. Менделеев*

Примечания Д. И. Менделеева

1. Весьма незначительное, но постоянное и теоретически понятное различие в составе воздуха на разных высотах рассматривается в сочинении Менделеева „О барометрическом нивелировании" (1876, стр. 46).[1] Ближайшие, хотя и краткие, сведения о химическом составе воздуха можно найти в сочинении Менделеева „Основы химии" и в его статье „О воздухе", помещенной в „Энциклопедическом словаре" проф. Березина.[2]

7. [внутренний поперечный разрез его (термометра) трубки должен быть одинаков по всей длине трубки.] Таких термометров в действительности нет и быть не может не только потому, что совершенно цилиндрические стеклянные трубки практически невыполнимы, но и потому еще, что с течением времени и при перемене температур и давлений термометрический шарик меняет свою форму и емкость, и еще сверх того потому, что за тело, расширяющееся равномерно с изменением температуры, принимается не ртуть, а газы, напр. воздух или водород. Подробности, касающиеся устройства, проверки, калибрования трубок и других особенностей, встречающихся при определении температур и при устройстве так называемых нормальных термометров, читатели найдут в сочинениях: Краевич. Учебная физика; Петрушевский. Курс наблюдательной физики, 2-е издание, и отчасти у Менделеева в сочинении „Об упругости газов".[3]

---

[1] Стр. 53–193 настоящего тома. (*Прим. ред.*)
[2] Д. И. Менделеев. Сочинения, т. VI, 1939, стр. 590–616. (*Прим. ред.*)
[3] Там же, стр. 221–589. (*Прим. ред.*)

8. Должно отличать ошибку (отступление) от поправки. Поправка имеет другой знак, чем ошибка. Если термометр в тающем льде показывает больше 0° (как это обыкновенно, при точно выполненных термометрах, и бывает), напр. останавливается на +0.°3, то ошибка равна +0.°3, а поправка = —0.°3. Для получения из показания термометра — истинной температуры должно к отчету *прибавить* поправку. Слово „прибавить" должны применять в смысле алгебраическом, т. е. обращая внимание на знак. Так, если поправка термометра = —0.°3, то, отчитав 10.°1 и —2.°8, получим истинные температуры 9.8 и —3.°1.

10. В обычных максимальных (для показания наибольшей температуры) термометрах помещается над ртутью поплавок из стали или эмали, который и толкается ртутью и при ее сжатии остается на месте, если термометр положен горизонтально. Система из одного максимального и одного минимального термометра часто применяется при производстве метеорологических наблюдений. Устройство таких термометров, несмотря на множество разнообразных систем, применяемых в практике, требует еще дальнейших улучшений как в отношении точности показаний, так и относительно их постоянства или правильности. Повидимому термометры, приготовленные из полос двух металлов, неравно расширяющихся, — дадут возможность достигнуть наилучших результатов.

11. [Вследствие этого внутренняя теплота не производит никаких изменений в тепловых явлениях, происходящих на земной поверхности, т. е. ни в количестве теплоты, ни в распределении ее.] Влияние внутренней теплоты земли на состояние ее поверхности составляет предмет, который рассматривали многие ученые и с разнообразных сторон: Фурье и Пуассон с теоретической стороны, Бишоф и многие другие геологи с исторической. Вопрос важен во многих отношениях, но и труден, потому что опытному исследованию подлежат только малые доли земли, близкие к поверхности (глубокие артезианские колодцы и шахты служат для определения температуры твердой части коры земной), а о температуре внутренней массы земного шара должно судить по наведению. Обыкновенно принимают, что внутри земли температура весьма высока. Это однако не всеми ныне признается. Предполагают также, но без опытных данных для наведения, что в разных частях небесного пространства температуры различны, а как солнечная система, а следовательно и земля с нею, меняют место в пространстве, то от того может быть изменение и в запасе внутреннего тепла земли. Строго говоря, наши понятия о всех этих вопросах гипотетичны и со временем могут измениться, если найдется способ опытного суждения о предмете, как, напр., найден путь (спектральный анализ) судить о составе солнечной атмосферы.

13.* [путь земли очень мало отличается от круга.] Эксцентриситет земной орбиты = 0.027, время полного оборота = = 365.256 дня (среднего времени), радиус экватора 6378 км, полуось 6357 км, до луны расстояние = 60.3 радиуса земных, до солнца = 23 300 радиусов земли.

13.** Теплопрозрачность воздуха, когда в нем нет облаков, тумана и т. п., судя по опытным исследованиям, так велика, что о задерживании тепла воздухом (а не осадками) ныне нельзя говорить с такою уверенностью, какая видна в изложении Мона.

14. [чем ниже стоит солнце ... , тем больше будет отрезок поверхности, на котором луч должен распределиться; тем меньше, значит, будет нагревание.] Этого закона одного достаточно для объяснения различия температур разных часов дня, и сказанное в предшествующем параграфе может быть обойдено.

16. Актинометры и др. приборы служат также для измерения напряженности солнечных лучей. Применяют также стекло, в фокусе которого помещается на некоторое время кусок дерева; по мере выжигания дерева судят о напряженности теплотных лучей. Солнечные пятна, уменьшая поверхность солнца, содействуют уменьшению испускаемого солнцем тепла. Оттого периоды погоды совпадают с периодом солнечных пятен. Вся область знаний о солнечной теплоте имеет громадный интерес, ибо от солнца зависят все перемены на поверхности земли и жизнь организмов. Предмет этот служит ныне для многих и разнообразных наблюдений, соображений и выводов.

26.* Замечена одиннадцатигодовая периодичность солнечных пятен и соответственная ей одиннадцатигодовая периодичность температур. Особенно ясно совпадение под тропиками; начиная с 1833 г. (maximum), наблюдений температур много и они хорошо соответствуют наблюдениям над периодами солнечных пятен. В умеренных странах соответствие есть, но оно выражено менее резко. Многие ученые занимаются вопросами этого рода. У нас занимался этим вопросом В. Кеппен.[1]

26.** [разность между господствующей температурой места и его нормальною температурою почти одна и та же для мест, лежащих недалеко одно от другого.] Это справедливо, но только тогда, когда оба места лежат не только на незначительном друг от друга удалении по земной поверхности, но и приблизительно на одной высоте над уровнем океана, потому что амплитуды отступают от нормы, изменяются — с изменением высоты места.

27. Описанные в последних параграфах методы для нахождения средних температур приложимы также и к вычислению средних величин влажности и давления воздуха.

---

[1] В подлиннике „2. Konneus". (*Прим. ред.*)

32. [от посторонних предметов не привходит (к воздуху) нисколько теплоты]. Это справедливым считать должно, но тогда не справедливо сказанное в 27-м пункте, который развивает ту мысль, что в атмосфере задерживается тепло. Это случается, если есть туман, облака и пр. Что касается до восходящих токов, которыми столь часто для объяснения метеорологических явлений пользуется автор, то они несомненно играют большую роль, но рядом с ними должно признать и участие в явлениях подвижности (диффузии) газов, свойственной природе газов. Этого Мон не развивает. Я надеюсь успеть еще в текущем 1876 г. подробно изложить вопрос о ходе изменения температур в разных высотах—в особой статье. Кратко некоторые мои соображения об этом предмете изложены в статьях моих в „Журнале Русск. Хим. и Физ. Общ." и в „Записках Парижской Академии Наук" (1875 и 1876). [1]

33. Для такого приведения температуры к уровню моря можно пользоваться тем эмпирическим выводом, который извлечен мною из наблюдений воздухоплавателей и удовлетворяет швейцарским и другим наблюдениям в горах. Он выражается формулою:

$$t = C + \frac{t_0 - C}{H_0} H,$$

где t_0 есть температура, данная в известном месте, где давление по барометру $= H_0$, а t есть искомая температура в том месте (напр. на уровне океана), где давление $= H$. Величина C есть постоянная, близкая к 40° Ц. Так, напр., если на горе наблюдены $H_0 = 650$ мм,[2] $t_0 = 2.°6$, то на уровне океана, где примем (по изгибу изобар, см. 3-ю главу) $H = 750$, температура будет около 9.°2.

46. [Клиновидную или языковидную ветвь, какую представляет в северном полушарии изотерма в 25°, мы находим также для изотермы в 20°.] Эти особенности, вероятно, связаны с направлением Гольфстрема.

50. В классическом произведении умершего американского метеоролога Мори-Море читатели найдут оригинальный и подробный свод сведений о морских течениях, о солености, температуре моря и пр.

53. [Недалеко от Британского канала, на глубине 1690 м, найдено +4°, на глубине 2640 м +3°, на глубине 4595 м, на дне, найдено 2.°5.] В подлиннике глубина моря дана в мерах Faden; но неизвестно, как велика эта мера. На английских морских картах употребляется для обозначения глубины брасс (fathom), которого величина составляет 1.829 м. Шведский брасс (Famm) равняется 1.781 м. Вообще брасс изменяется между 1.62 и 1.883 м.

[1] Стр. 11—50 настоящего тома. (*Прим. ред.*)
[2] В подлиннике опечатка „65°". (*Прим. ред.*)

В тексте приняты, для общности, французские меры, причем Faden (прусский) принимался равным 1.883 м.

58. При этом предполагается равенство поверхностей, взятых на земном шаре; но действительная испаряющая поверхность земли, покрытой растительностью, несравненно более, чем испаряющая поверхность воды, а потому и существует указанное в тексте различие.

59. Испарение в Петербурге в 1873 г. было равно (средним числом в один день) по месяцам, начиная с января (в миллиметрах): 0.17, 0.18, 0.33, 0.61, 0.88, 2.06, 2.58, 1.55, 1.05, 0.78, 0.27, 0.28. Средняя высота ежедневного испарения = 0.90 мм, а потому в 1873 г. в Петербурге испарилось 329 мм или около трети метра. Значительное испарение летом играет большую роль в движении соков в растениях.

60.* Эти понятия известны под именем *закона парциального давления* или закона Дальтона. См. о том мои сочинения „Основы химии", т. I и „О барометрическом нивелировании".[1]

60.** [давление (пара) с небольшими лишь отступлениями пропорционально весу пара.] Точное выражение есть: $p = \frac{1.06}{1 + at} h$, где p есть вес куб. метра водяных паров, имеющих температуру t и упругость h, величина a есть коэффициент расширения паров и газов = 0.00368. Число 1.06 = произведению из веса куб. метра воздуха на плотность водяного пара, деленному на величину нормального давления = $\frac{1.293 \cdot 0.623}{0.76}$. Подробности см. цитированные книги.

71. [Количество водяных паров уменьшается с возвышением . . . поверх 6500 м находится только $^1/_{10}$ всего атмосферного пара]. Аэростатические восхождения показывают все это с очевидностью. Так, Глешер на соответствующих высотах, когда температура при поверхности была в среднем около 15° и упругость пара 10 мм, нашел:

На высоте 2500 м упругость составляет . . . . 3 мм
На высоте 8000 „ „ „ . 9.2 „

В самых высоких слоях атмосферы не оказывается, по наблюдениям погибших воздухоплавателей Сивеля и Кроче-Спинеля, и тех брюстеровых линий солнечного спектра, которые отвечают водяному пару.

72. Весьма поучительно сравнить между собою не только распределения тепла и влаги, но еще и распределение быстроты испарения и количества осадков в разное время года и на различных частях земли. Воейков в своей статье „Atmospherische Circulationen", помещенной в приложениях к журналу Петермана, дает обзор многих современных сведений, касающихся подобных

[1] Стр. 53—193 настоящего тома. (*Прим. ред.*)

вопросов. Статья эта известного русского метеоролога должна, как я знаю, явиться и на русском языке. Путешествие Воейкова в тропические страны служило этому задержкою.

Между тропиками испаряется воды в год больше, чем падает в наших широтах обратно, а около полюсов перевес еще больше. Испарилось в Петербурге в 1873 г. около 330 мм, упало около 640 мм (это, впрочем, больше среднего, близкого к 450 мм). По месяцам различие еще яснее. Зимой испарение очень мало; а падает влаги много. Это — отличное указание того, что в наши широты приходит влага с юга. Переход совершается в верхних слоях атмосферы. На эти отношения следовало бы обратить, по моему мнению, больше внимания, чем то делают метеорологи до сих пор.

74.* [Если пункт ... окружен облаком, то, понятно, его относительная влажность будет велика.] Аэронавты наблюдали близ облаков и довольно большую сухость. Это можно себе до некоторой степени уяснить, представляя, что под влиянием силы сцепления, играющей огромную роль при образовании облачных пузырьков и отдельностей, испарение замедляется.

74.** [На море относительная влажность колеблется всегда между 75 и 80 процентами]. Это очень поучительно, ибо отлично указывает на то диффузионное стремление паров в верхние слои атмосферы, которое я рассматриваю на стр. 50[1] и сл. своего сочинения „О барометрическом нивелировании".

78.* [если же звук будет тупой или его вовсе не будет, то в трубке находится воздух.]. Признак этот нельзя считать абсолютно верным. Способы нахождения поправок на упругость воздуха в пустоте и др. рассмотрены в моих сочинениях: „О барометрическом нивелировании" [стр. 106][2] и „Об упругости газов", т. I.[3]

78.** [Следовательно, чем больше поперечный разрез трубки, тем слабее действие капиллярности]. Поправка показаний барометра на депрессию также рассмотрена в указанных сочинениях.

79. [В табл. III даны температурные поправки показаний ртутного барометра при различных высотах его и различных температурах]. В этих таблицах температуры даны все выше 0°, а при этом поправка всегда отрицательная. Если температура будет ниже 0°, то поправку надо считать положительною. Считаем необходимым заметить, что показания ртутного барометра должны быть еще исправлены по отношению к широте места наблюдения. См. вышеуказанные сочинения.

---

[1] Стр. 99 настоящего тома. (*Прим. ред.*)
[2] Стр. 53—193 настоящего тома. (*Прим. ред.*)
[3] Сочинения, т. VI, 1939, стр. 221—589. (*Прим. ред.*)

80. Для нахождения поправок данного барометра, при сличении его с нормальным барометром, должно сделать по крайней мере три наблюдения, при возможно различных давлениях.

82. [в сифонном барометре не существует влияния волосности.] Они есть и там, но могут быть меньше. Это рассмотрено в двух выше цитированных моих сочинениях.

83. [При переносе инструмента открытое колено запирают пробкой.] При этом лучше всего в короткое колено сперва влить столько ртути, чтобы она заполнила всю длинную ветвь барометра и почти всю короткую ветвь. А еще лучше, если длинная ветвь снабжена сужением, препятствующим воздуху входить в барометр при обращении его низом кверху. В этом последнем положении всего безопаснее переносить барометр.

85. [Показания его (барометра) при дальнейшем присутствии наблюдателя около инструмента могут увеличиться без соответственного увеличения температуры ртутного столба в барометре]. Чтобы это не случилось, полезно шарик термометра окружать стеклянною трубкой такого же диаметра, как и трубка барометра, и наполнять эту трубку ртутью; тогда всякое нагревание единовременно будет действовать на ртуть барометра и шарика.

86.* Формула, которою можно выразить истинное давление H по наблюденному отчету h и по замеченной температуре t, должна иметь вид

$$H=h+A+Bh+Ct,$$

где A, B, C суть постоянные, изменяющиеся от одного анероида до другого. Очевидно, что для нахождения численных величин A, B, C необходимы многочисленные сличения анероида с ртутным барометром. Заметить должно по отношению к анероидам, что их должно наблюдать в таком положении, чтобы шкала была горизонтальна, и перед наблюдением необходимо сообщить инструменту легкий толчок.

86.** Такая система принята ныне в России для выражения метеорологических наблюдений, а равно и во всех странах, вошедших в соглашение на метеорологическом конгрессе, бывшем в 1874 г. в Вене.

89.* Подробности, относящиеся до применения барометра к определению разности высот, читатели найдут в упомянутом выше сочинении „О барометрическом нивелировании".

89.** Такие приборы иначе называются *регистрирующими* барометрами. Простейший вид приборов этого рода представляет коробка анероида с указателем, конец которого движется по боковой поверхности цилиндра, вращающегося посредством часового механизма. Для регистрации метеорологических данных часто применяется фотография, и я думаю, что это самый луч-

ший способ метеорологических наблюдений, о чем говорено и в предисловии.

90. [суточный ход атмосферного давления в его средней величине для целого года.] Для получения такого результата слагаются ежедневные наблюдения, сделанные в данные часы, и полученная сумма делится на число слагаемых, через это получается среднее давление, отвечающее данному часу. Данные берутся за много лет, если желают выразить суточный ход барометра независимо от временных влияний.

92. [при увеличении температуры усиливается только образование паров..., распространяясь в атмосфере, они отчасти гонят воздух перед собою.] Нельзя считать доказанным, чтобы это последнее происходило так, как думает Мон. Достаточно того, что от испарения воды воздух становится легче, чтоб объяснить влияние влажности в том смысле, какой придал делу автор.

93. [вначале барометр будет подниматься, пока достигнет предполуденного максимума.], потому что к упругости воздуха прибавляется упругость водяных паров.

94. [в верхних пределах атмосферы образуется свободное пространство, способное вместить новые массы воздуха, которые и притекают туда со всех сторон и своею тяжестью еще более увеличивают атмосферное давление.] Автор, повидимому, упустил одну из главных причин, определяющих увеличение давления зимою. Она состоит в том, что зимою абсолютное количество водяных паров, сравнительно с летом, не велико, а потому зимний воздух тяжелее летнего не только вследствие низшей температуры, но и вследствие малого содержания паров.

95. [Распределение атмосферного давления по земной поверхности.] По важности и новости предмета, было бы полезным дополнить изложение автора весьма обстоятельною статьею об изобарах известного русского метеоролога Воейкова, но автор предполагает выдать свою статью отдельно и дополнить ее новейшими результатами, а потому мы и отложили это свое намерение; будем желать, чтобы наша литература обогащалась по предмету, долженствующему иметь большое значение для дальнейших успехов науки о погоде.

99.* Ветер, очевидно, следует наклону земной поверхности, а потому в горных долинах направления ветров очень часто не горизонтальны, а значительно уклоняются от этого направления. Кроме того, с давних пор известно, что направление ветра нередко бывает не параллельно направлению горизонтальной плоскости. Это уклонение от горизонтального направления обыкновенно не принимают в расчет при определении силы ветра. Строго говоря, следовало бы поступать так, как поступают при изучении земного магнетизма, т. е. определить азимут ветра и наклон его к горизонту.

99.** Этими 16 румбами отмечаются направления ветров следующим образом:

Северный ветер	N	Северо-восточный	NO
Северо-северо-восточный . .	NNO	Востоко-северо-восточный . .	ONO
Восточный	O	Юго-западный	SW
Востоко-юго-восточный . . .	OSO	Западо-юго-западный	WSW
Юго-восточный	SO	Западный	W
Юго-юго-восточный	SSO	Западо-северо-западный . . .	WNW
Южный	S	Северо-западный	NW
Юго-юго-западный	SSW	Северо-северо-западный . . .	NNW

Восточный румб отмечается иногда знаком E.

100.* [Происходящая при этом ошибка может дойти до $11^1/_4$ градусов или составит один румб компаса.] Подразумевая румбы морские. У моряков 32 румба носят особые названия, причем N называется норд, O — ост, S — зюйд и W — вест, а прочие слагаются из этих слов и слова *тен*, напр. между N и NNO находится румб из NtO, что значит норд-тен-ост, или = северный с уклонением на восток.

100** Метеорологические данные всюду и давно сближены с магнитными наблюдениями. Следовало бы в теоретической метеорологии подробно разбирать магнитные наблюдения.

101.* Весьма удобно устраивать иногда флюгер для метеорологических наблюдений на длинной оси, доходящей до окна наблюдателя. На оси противу окна прикреплен круг с румбами. Только такой флюгер должен быть хорошо центрирован и уравновешен. Позиция флюгера (выше дерев, холмов, кровель) очень важна для точности результата.

101.** [Направление облаков, во многих случаях, бывает совершенно иное, чем направление ветра на земной поверхности.] См. об этом в предисловии.

104. Морская миля = $^1/_{60}$ доли градуса меридиана, или = минуте по дуге меридиана. Она = 1852 м. Она называется иначе итальянскою милею. Делится на 120 морских узлов. Однако, чаще узлы навязываются на расстоянии 48 фут.

108. Покажем здесь, как выводится *среднее для ветров* (анемометрическое среднее). Способ, который мы здесь приведем, принадлежит Ламберту.

При выводе анемометрического среднего необходимо принять в расчет направление ветра, его продолжительность и скорость (или силу). Положим, что в течение известного времени, напр. месяца, наблюдались и записывались все эти три элемента для каждого ветра. Результаты комбинируют следующим образом: все продолжительности ветра одного какого-нибудь румба, напр. N, складывают в одну сумму, а из всех наблюдавшихся скоростей для этого ветра выводят арифметическое среднее и берут произведение всей продолжительности ветра на эту среднюю ско-

рость. Таким образом, получают 8 произведений, соответственно 8 главным румбам. Каждое такое произведение выражает (относительно) объем воздуха, пронесшегося в данном направлении, в течение рассматриваемого времени (предполагая, что толщина движущегося слоя воздуха остается постоянною). 8 произведений приводятся, затем, к четырем румбам, именно—каждое из произведений, соответствующих румбам NO, SO, SW и NW, разлагается по правилу параллелограмма сил на два направления по тем румбам, между которыми оно содержится, т. е. на N и O, O и W и пр. Получатся 4 произведения. Из них N и S, O и W, как противоположные, складываются с противными знаками, после чего остаются только два направления. По правилу параллелограмма сил строят равнодействующую этих двух направлений. Это и будет искомое среднее. Общая формула, по которой выводится эта средняя, такова. Назовем через N произведение скорости на продолжительность для северного ветра, NO—для северо-восточного и пр. и обозначим φ угол, на который искомое среднее направление уклоняется от N, тогда получим:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{O - W + (NO + SO - SW - NW)\cos 45^\circ}{N - S + (NO + NW - SO - SW)\cos 45^\circ}.$$

Средняя скорость ветра — назовем ее x — выразится

$$x = \sqrt{A^2 + B^2},$$

где A есть числитель, B—знаменатель вышеприведенного выражения.

Для полного приложения этого способа расчета необходимо, чтобы наблюдения производились непрерывно, при помощи самопишущих анемометров. Если же наблюдения производились только в определенные времена, то вместо продолжительности данного ветра берут число повторений этого ветра с соответствующей каждому наблюдению скорости. (Дополнил, по Ламберту, Иорданский.)

111. В январе в средней России дуют преимущественно южные ветры с уклонениями к O и W. Уклонения к O преобладают. У Черного и у Белого морей преобладают ветры северного направления. В июле во всей России преобладают западные ветры, у морей Черного и Белого они уклоняются к югу, а в центральных частях—к северу, так что здесь в июле преобладает NW, а в январе SO. В год попадает в Россию более западных ветров, чем восточных, и больше северных, чем южных. Точно ли это—еще неизвестно.

113. Ближайшую задачу составляет затем определение господствующего ветра в тех областях атмосферы, где ходят облака. Здесь данных мало, задач зато—много.

114. Этот закон установлен умершим голландским ученым Бейс-Баллотом. Теоретически он ясен. См. предисловие.

117. Вследствие той же центробежной силы всякая движущаяся частица воздуха должна стремиться удалиться от земной поверхности. Это одна из причин восходящих течений воздуха. Очевидно, что, с другой стороны, будут другие частицы воздуха занимать освобождающееся пространство, а потому неизбежно должны существовать и нисходящие течения.

118. Одну из ближайших задач воздухоплавателей, предпринимавших полеты для метеорологических целей, должно составить изучение токов воздуха в верхних слоях атмосферы при различных условиях погоды.

119. Особые услуги в этом отношении имеют отлично описанные воздушные путешествия англичан, а особенно Глешера, который в 1862—1865 гг. совершил 28 путешествий. Малость страны, близость моря, островной климат, отсутствие предшествующих восхождений, необходимых для ориентирования, и некоторые другие причины делают эти наблюдения Глешера ныне уже далеко недостаточными для многих живых вопросов метеорологии. Россия с ее условиями приличнее всех стран для продолжения дела, в котором Франция и Англия уже сделали очень многое. Это побуждает меня громко говорить о необходимости учреждения в России воздухоплавания с метеорологическими целями. Суммы, вырученные за продажу этой книги, поступят на этот предмет.

121. Для объяснения бризов имеет особое значение тот закон разности плотности воздуха, от которого, по мнению моему (см. предисловие), происходят некоторые вариации ветровых направлений. Здесь недостаточно допущения одного различия давлений как причины ветров. То же, как думаю я, без всякого сомнения, окажется необходимым и при ближайшем объяснении ветров в других случаях.

122. [Оба эти течения (глубинное и поверхностное) точно так же, как ветры, подвержены влиянию вращательного движения земли.] То же самое и для рек. Для России это показал Бэр. Оттого правый берег высок.

123. Известная книга Мори (см. выноску [50]) начинается неподражаемым по впечатлительности описанием этого океанического течения: „Гольфстрем есть река, — пишет Мори, — среди океана. Она не высыхает в жаркое время года, не выступает при сильнейших дождях. Берега ее образованы холодною водою, а в ней течет теплая. Истоком ее служит Мексиканский залив, устьем — полярное море. На земле нет другого такого мощного потока. Скорость течения вод здесь больше, чем в Миссисипи и Амазонской реке".

128. [Случается также, что поля по утрам бывают покрыты

инеем, а минимальный термометр, повешенный у окна в верхнем этаже, вовсе не показывает градусов холода.] Это случилось однажды мне лично наблюдать и должно было бы подвергнуться особому исследованию.

130. В последнее время стали утверждать некоторые (Кобер), что туман, облака и тому подобные осадки состоят не из пузырьков, а из капелек. Однако прежние наблюдатели так ясно доказали пузыристое строение (подобно малым мыльным пузырькам) осадков, что нет повода сомневаться в этом. Соссюр прямо наблюдал пузырьки в облаках на Альпах, имея лупу в руках. Теория вопроса также развита хорошо, а потому в этом отношении вопрос об облаках стоит твердо. Но то, что содействует образованию пузырьков (озон? перекись водорода? крупинки пыли?), что заставляет превращаться в капли и тому подобные вопросы — еще совершенно неясны. Важную задачу метеорологии составляют ответы на эти вопросы.

131. В последнее время теорию образования облаков от встречных или имеющих разную скорость течений воздуха стали развивать многие. Наблюдения на аэростатах одни могут решить эти вопросы с некоторою определенностью.

133.* Пользуясь такими же, как у Мона, соображениями, я развил в 1875 г. в общей форме те начала, на которых должна в нормальных условиях изменяться температура разных слоев воздуха. Результат расчета подтверждается числами Глешера. Мои статьи об этом помещены в „Ж.Р.Х.Ф.О." и в отчетах Парижской академии [стр. 15—36].

133.** Все затруднение вопроса состоит в том, что: a) аэронавты часто не наблюдали вовсе слоя, насыщенного парами, b) часто около облаков воздух не насыщен, c) часто облаков вовсе нет и d) диффузия паров играет во всем этом деле очевидно огромную роль, а сведения о ней малы.

134. [Перистые облака... состоят из нежных ледяных иголочек.] Изучение их хода (уже началось) должно подвинуть решение вопросов о верхних слоях атмосферы. Обыкновенно они выше 8 верст.

135.* В метеорологических отчетах принято обозначать перистые облака (Cirrus) буквою C, кучевые (Cumulus) — Cu, слоистые (Stratus) — S. Перисто-слоистые облака означаются буквами CS, перисто-кучевые — CCu, слоисто-кучевые — CuS.

К классификации облаков относятся также тучи (Nimbus), обозначаемые буквою N. В метеорологических отчетах обыкновенно ставят рядом цифру (от 0 до 10), выражающую облачность, и буквы, характеризующие вид облаков. Напр. 8 CuS обозначает, что $\frac{8}{10}$ неба покрыто слоисто-кучевыми облаками. Если видны разные роды облаков, то это обозначается так, что верхние

облака ставятся над чертою, а нижние под чертою, напр. $\frac{S}{CuS}$ обозначает, что видны перистые облака и слоисто-кучевые.

135.** [Облачность определяется тем, что представляют себе все облака собранными в одно место и рассчитывают, какая часть неба в этом случае ими закрылась бы.] Взяв зеркальный шар, легко на нем сделать точное определение. Этот прием, предлагаемый и испробованный мною, достоин дальнейшей разработки, тем более, что при помощи такого шара легко можно наблюдать и за направлением течения облаков и определять их угловую скорость. Когда мне дозволит время, я предполагаю развить указываемое здесь в подробностях.

136. [Облачность имеет также и годовую периодичность, различную для разных мест.] Для России начал исследования этого рода г. Вильд. Достигнутые им результаты могут получить интерес, если подтвердятся дальнейшими наблюдениями (особенно в связи с ночными) и будут объяснены. Вообще облачность у нас зимою больше, чем летом.

139.* При организации метеорологических обсерваторий для наблюдения количеств выпавшего снега должно устроить такой дождемер, чтоб попадающий снег тотчас таял. Во всяком случае при сильном ветре полезно иметь несколько дождемеров и чаще один заменять другим для того, чтоб попавший в дождемер снег не уносился обратно из прибора.

139.** В упоминаемой выше статье Воейкова помещена новейшая карта распределения и количества дождей на земной поверхности.

142.* [встречаются также некоторые отдельные местности, где количество выпадающих дождей таково же, как и в тропических странах.] Так у нас за Кавказом в Поти выпадает до полутора метра дождя.

142.** [В Барнауле, например, годовое их (осадков) количество только 190 мм.] Оно в действительности, в среднем за много лет, около 225 мм. В 1873 г. в Барнауле выпало 226, в Пекине 872 мм.

143. [годовое количество дождей колеблется в ней (северной части западного берега С. Америки) между 1500 и 3000 мм.] Эти числа относятся к береговым странам Европы.

148. Важнее было бы знать не один ветер земной поверхности, а ветер, господствующий в массе воздуха. Тогда узнали бы — откуда пришел тот воздух, который теперь в данной местности. Направление ветра на поверхности земли сильно зависит от мелких местных обстоятельств почвы, хотя несомненно, что часто ветры одного румба дуют в разных высотах — облака идут в ту же сторону, как и ветер на поверхности земли. Этот факт и служит основанием при расчете роз ветра.

154. Считаю не излишним обратить особое внимание читателей на розы ветров и особенно на последнюю, потому что в них ключ к пониманию погоды. Ветер приносит воздух другой страны и тем изменяет климат этой страны, тем делает погоду.

157. [о главнейших причинах, производящих падение или повышение барометра.] Этими причинами объясняются образования барометрических минимумов, значение которых весьма велико, как объясняется далее.

161. [Направление ветра лежит между направлением градиента и изобарическою линиею, ближе к последней.] Для памятования этого правила нам кажется удобнее представлять себя стоящим лицом противу ветра, потому что в таком положении определяется ветер. При таком положении впереди и налево будет то направление, в котором находится наибольшее давление, т. е. направление градиента. Еще общее сказать, что угол градиента, идущего к наибольшему давлению, немногим менее угла ветра, если направление и градиента и ветра определять румбами в направлении часовой стрелки.

163. Аэростатические восхождения ясным образом доказывают, что скорости воздуха весьма различны на земной поверхности и на различных высотах от поверхности.

171. Причины некоторого соответствия между очертанием берегов и изотермами и изобарами по картам 12, 14, 15, 17 и др. понятны из того различия между нагреванием суши и моря, которое выше многократно указывалось.

172. Воздушные путешествия в связи с систематическими наблюдениями над движением облаков должны уяснить, какую роль играют здесь температура и направление ветров, дующих в верхних областях атмосферы. Должно думать, что такое влияние существует.

191. Мысли, выраженные Моном в этом параграфе, состоят в том, что вихреобразное движение происходит не с одною, некоторою массою воздуха, переносящеюся с места на место по земной поверхности, а с все новыми массами воздуха. Есть условия наименьшего давления. Они перемещаются по поверхности земли и им подчиняются последовательно различные части земной атмосферы. То же самое для гроз, см: § 379 и сл.

196. [Так как в верхних пределах атмосферы воздух претерпевал сильное лучеиспускание теплоты.] Точнее сказать, что воздух верхних пределов атмосферы охлаждается от расширения.

216. Редфиельд, Портер и другие показали, что в тропических бурях расширение вихря происходит медленно между тропиками, а по переходе вихря за тропики расширение совершается чрезвычайно быстро.

234. Мон публиковал атлас бурь, бывших в Норвегии: „Atlas des tempêtes de l'Institut metéorologique de Norvège".

244. Береговые бризы составляют регулятор берегового климата. Здесь погода и климат тесно связаны.

248. Сигналы, относящиеся до погоды, выставляются также и в русских портах Балтийского моря на основании телеграмм, получаемых в С.-Петербургской главной метеорологической обсерватории. Телеграммы о погоде, как известно, ежедневно печатаются в наших газетах.

ИЗДАНИЯ Д. МЕНДЕЛЕЕВА

Об упругости газов. Отчет об опытах, произведенных Д. Менделеевым на средства, отпускаемые Русск. техническим обществом. Том I. С 12-ю таблицами рисунков. 1875 г. Цена 7 руб. Том II. С рисунками (печатается). Цена 7 руб.

О барометрическом нивелировании и о применении для него высотомера. Д. Менделеева, с таблицею рисунков. 1876 г. Цена 2 руб.

Мон. Метеорология или учение о погоде. С 34 рисунками и 17-ю таблицами карт. Перевод Н. Иорданского и Ф. Капустина, под редакцией и с дополнениями Д. Менделеева. 1876. Цена 4 руб.

Материалы для суждения о спиритизме. Издание Д. Менделеева. С 20-ю рисунками. Цена 4 руб.

Содержание: протоколы комиссии для рассмотрения спиритических явлений, 36 приложений к протоколам комиссии; статьи гг. Квитка, Мясоедова, Боргмана, Шевиллара, Лавуазье и Бирда и публичные чтения Д. Менделеева о спиритизме.

Суммы, которые могут быть выручены (до 1880 г.) от продажи этих сочинений, назначаются на устройство большого аэростата и вообще на изучение метеорологических явлений верхних слоев атмосферы. Отчеты о приходе и расходе этих сумм и имена лиц, подписавшихся единовременно на все эти сочинения, будут опубликованы.

Продажа и подписка: в книжном магазине „Для Иногородних" М. П. Надеина, С.-Петербург, Невский, № 44.

Лица, платящие при подписке 23 руб., получают (без пересылки) вышедшие книги и билет (с подписью Д. Менделеева) на получение второго тома сочинения „Об упругости газов". По этому билету, при выходе книги из печати, получают ее из магазина для иногородних.

Лица, платящие при подписке 25 руб., прилагают свой адрес и получают по почте: 1) извещение о получении денег, 2) четыре вышедшие книги, 3) 2-й том сочинения „Об упругости газов", по выходе его из печати и 4) отчеты о приходе и расходе сумм, поступающих от продажи вышепоименованных книг.

1876. Это* относится также к № 87. Я счастлив был тем, что на многие мои работы являлась критика— значит там было новое и внимания достойное.

89. О температурах атмосферных слоев (ответ М. А. Рыкачеву), („Ж[урнал] Р[усского] физ[ического] общ[ества]", т. VII, стр. 10. 1876.)

---

* Последующая фраза? (*Прим. ред.*)

Журнал Русского Химического Общества и Физического Общества 1876 г., т. VIII, часть физ., отд. 1, вып. 1, стр. 19—53

О ТЕМПЕРАТУРАХ АТМОСФЕРНЫХ СЛОЕВ

(Статья эта составляет ответ на „Некоторые замечания" М. А. Рыкачева)

Занимаясь вопросом о разреженных газах, я невольно вступил в область, близкую к метеорологии верхних слоев атмосферы, т. е. тех, где воздух разрежен. Сверх того, к тому же предмету привели меня исследования над применением барометров к определению высот.[1] Да и сами по себе вопросы о верхних слоях атмосферы, несмотря на обширную литературу этого предмета, еще столь мало разработаны, что казались мне вполне достойными всеобщего внимания по их важности особенно потому, что в слоях атмосферы, удаленных от земли, должно искать то место, где образуется большинство метеорологических явлений земной поверхности. Особенный и преимущественный интерес при этом имеют сведения о температуре разных слоев атмосферы. В заседаниях Физического Общества 7 октября и 4 ноября 1875 г. я изложил первые результаты моих студий именно по этому вопросу. Первое сообщение представляет результат изучения всех знаменитых аэростатических восхождений, а особенно восхождений Глешера (1862—1866). Глешер сводит свои наблюдения в таблицы, показывающие разность температуры при данной разности высот, считая от почвы. Такой способ применили Гей-Люссак при отчете о своем знаменитом воздушном путешествии (1804 г., сентябрь). Способ этот я считаю неудачным и это доказываю с уверенностью тем, прежде всего, что высоты прямо не наблюдаются, а находятся по гипсометрическим формулам, в основании которых лежат гипотезы: о совершенном покое воздуха, о точной применимости мариоттова закона к разреженным газам и о пропорциональности изменения температур с высотами, а все эти предположения не отвечают действительности; главною же причиною неудачности

[1] О всем этом я писал в I-м томе моего сочинения „Об упругости газов", 1875. Вскоре должна, сверх того, явиться в печати моя статья о барометрическом нивелировании.

вышеуказанного приема служит то обстоятельство, что температуры t_i разных воздушных слоев суть функции не только высот z_i, но и начальной температуры t_0 нисшего слоя, а Глешер, подобно многим другим, ищет общую зависимость $t_0 - t_i$ от z_i.[1] Оттого-то все, что сделано было до сих пор при сличении t_i с z_i, не представляет никакой общности. Отыскивая зависимость t_i от

[1] Здесь я считаю необходимым указать, что г. Рыкачев ошибается, думая, что „таблица Глешера основана только на действительно наблюдаемых переменах температуры". Так, например, при восхождении 5 сентября 1872 г. Глешер на высоте 0 считает при подъеме 62.°0, при спуске 62.°6 (См. „Repp. of the Brit. Assoc., 1862, p. 448), хотя данных на то в его отчете и нет (есть 59.°5 и 57.°5 при почве), а на высоте 19 000 фут. — наблюдения при восхождении дали 15.°0, а при спуске 17.°5, но в таблицу вошли следующие числа: при почве приняты $t = 77.°2$ и 62.6, на высоте 19 000′ = 9.0 и 10.0, разность при подъеме 77.2 — 9.0 = 68.2, при спуске 62.6 — 10.0 = 52.6, что и содержится в таблице выводов Глешера 1862 г., стр. 451, где для 5 сентября дана разность для 0 — 19 000 фут. = 67.2 для подъема и = 53.·0 Ф. для спуска, Должно было бы считать: 47.°0 и 45.°1. Таковы же и все другие числа, служившие Глешеру для вывода среднего. Это среднее для 19 000′ выводит Глешер для ясной погоды в 1862 г. = 58.3, в 1863 г. = 53.°6, для облачной 41.9; в 1864 г. (принимая в расчет все предшествующие восхождения, а в этом году было не одно восхождение до высоты более 15 000 фут.) для ясной погоды; средняя разность дана = 51.°1, для облачной 48.°1. Для всякого, кто ознакомится хоть сколько-нибудь со способом вывода средних Глешера, станет ясно, что его средним нельзя придавать значения — это неудачный плод спекуляций Глешера, который однако, несмотря на то, есть образцовый наблюдатель. Можно из чисел Глешера вывести действительные средние числа разностей наблюденных температур — тогда и будет видно, что те, которые дает Глешер, негодны к делу. Я делаю это здесь для высоты 19 000 фут.

	17 июля 1862 г. (стр. 444). *облачно*		18 августа (стр. 445 и 446). *облачно*		5 сентября (стр. 448). *отчасти ясно*	
	Восхождение	Спуск	Восхождение	Спуск	Подъем	Спуск
$t_0 - t_{19}$	22.°0	—	45.2	42.0	47.0	45.1

	31 марта 1863 г. (стр. 476). *отчасти ясно*		18 апреля 1863 г. (стр. 477). *облачно*		26 июня (стр. 478). *очень облачно*	
	Подъем	Спуск	Восхождение	Спуск	Восхождение	Спуск
$t_0 - t_{19}$	45.4	40.1	51.2	—	44.0	37.8

Больше нет данных для 19 000 фут. высоты. Взяв среднее из четырех полных наблюдений, получаем: 43°.3; взяв среднее из всех 10 данных, имеем 42.°0, а Глешер вывел в конце концов 52.°1 и 48.°1.

Г. Рыкачев вероятно укажет, чем руководствовался он, считая таблицы Глешера, показывающие * средние разности температур, отвечающими „действительно наблюдаемым переменам температур". Невыгода и произвольность приема, применяемого Глешером для вывода своих таблиц, видны, кроме того, еще в том, что при этом служат температуры воздуха на поверхности океана, а они или не наблюдались, или наблюдались не вполне (напр. при начале подъема, но не при окончании его), и часто должны быть выводимы из наблю-

* В подлиннике по опечатке „показывающими". (*Прим. ред.*)

H_i, я надеялся устранить важное неудобство прежних приемов, так как при этом определение высоты z_i совершенно выпадает и сравниваются величины, прямо наблюдаемые. Мне были известны попытки этого рода у некоторых из прежних исследователей вопроса, но я знал: 1) что исследователи эти не пришли ни к какому определенному или достоверному, общему результату, [1] 2) что лучшие аэростатические наблюдения, принадлежащие бесспорно Глешеру, до сих пор этим способом не обработаны были никем, 3) что никто, кроме Бауернфейнда, которого вывод недопустим, не старался проложить тот же путь, и притом одновременно с разбором аэростатических данных, к изучению температур, наблюдаемых в горах, и 4) что аэронавты прилагают к своим наблюдениям и поныне прием сличения температур с высотами, а не с давлениями. Так поступал и г. Рыкачев при описании своего воздушного путешествия, так поступал и Тиссандье [2] в самое последнее время. Поступая иначе, отыскивая зависимость t_i от H_i, я разобрал, преимущественно *без исключения, все* 28 полетов Глешера. Их можно разделить прежде всего на 2 категории; в одних есть *правильность*, последовательность изменения t с переменою H, — в других ее не замечается. Иногда в одной части пол та (при подъеме и спуске), т. е. в некоторых слоях, замечается правильность, в других слоях

дений удаленной обсерватории, и, что всего важнее, температуры на земле зависят от влияний соседних предметов, а потому, строго говоря, и не суть температуры, которые требуется разыскивать, обсуждая вопрос о температуре воздушных слоев. Это последнее я развил и это же, как будто бы совершенно оригинально, утверждает г. Рыкачев в своих „замечаниях", а потому советует аэронавтам вмещать термометр в двойную клетку с вентиляторами. Если я когда-нибудь полечу в аэростате для наблюдения температур воздуха, то ни за что не стану следовать совету г. Рыкачева по причине того, что побоюсь медленного изменения температуры стенок его двойной клетки, а времени для наблюдения у аэронавта не много. Лучше я возьму термометр с металлическими стенками и с очень большою поверхностью, удалю его от себя и корзины, прикрою его как можно более легкою затеняющею покрышкою и стану наблюдать его в отчетную трубу. Впрочем это дело опыта, а не теоретического рассмотрения, которому подлежат для нас законченные и отлично описанные данные Глешера, достоинство которых ни малейше не уменьшается от той или другой их обработки самим Глешером, или мною, или г. Рыкачевым.

[1] Г. Рыкачев указал на Гершеля, который искал зависимость от H для наблюдений, сделанных ранее Глешера. Я этого не знал до сих пор и книги Гершеля, на которую указывает г. Рыкачев, не имею под руками. Однако меня удивляет то обстоятельство, что Гершель (Sir J. Herschel) был членом того самого комитета британской ассоциации (Brit. Assoc., 1862, 376), который организовал восхождения Глешера, не посоветовал Глешеру обработать зависимость t от H. Если бы Гершель считал зависимость t от H единственно возможною для точного исследования, то он вероятно поступил бы так, а иначе должно допустить, что на свой прием он смотрел просто как на эмпирический способ интерполирования.

[2] См., например, его последний отчет ноября 1875 г. (Comptes Rendus, p. 1216).

ее нет. В тех случаях, когда правильности нет (эти я стану для краткости называть неправильными восхождениями), постоянно было одно из следующих условий: или были облака, туман, дождь, снег, или же ветер в разных слоях изменялся. Примерами правильных, последовательных изменений данных (t и H) могут служить восхождения 5 сентября 1862 г. и 31 марта 1863 г., примерами неправильных 17 июля 1862 г. и 12 января 1864 г. Сам Глешер для своих выводов ими не пользуется. Отобрав правильные полеты, затем легко разделить их на высокие восхождения и на такие, где высота поднятия не превышала 2500 м. Сюда относится большинство позднейших (1864) и все последние (1865 и 1866) воздушные путешествия Глешера. Все правильные восхождения в *пределе точности наблюдения*, как я изложил в протоколе заседания 7 октября (и что подробно разовью в готовящейся статье), выражаются:

$$t = C + kH \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

прямыми линиями, а постоянное C в этом выражении всегда оказывалось близким к —32° Ф., или к —29° Р., или к —36° Ц. Этот второй вывод виден в следующей общей формуле:

$$t_i = C + \frac{t_n - C}{H_n} H_i \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Формулы (1) и (2) суть эмпирические, следовательно прилагаемые в пределе точности наблюдений и только к тем случаям, которые разобраны. Спрашивалось: можно ли их применять к другим местам, чем Англия, к другим часам суток, чем те, в которые летал Глешер (так, например, к часам ночи), к другим климатам, чем английский? Ответ получился утвердительный, опять в пределах точности наблюдения, потому что, рассчитывая данные Швейцарии и особенно зимние наблюдения в высоких горах, разбирая наблюдения в тропических горах и данные других аэронавтов, — получаем для C в среднем величины, близкие тем, какие дают отдельные наблюдения Глешера. Если C изменяется от —25 до —45° (считая по стоградусному термометру) в разных вышеуказанных случаях, то такая же изменчивость встречается и в восхождениях Глешера, но я показал, что достаточно малой разности в наблюденных температурах, чтобы вышла в C выше-получаемая разность. Однако повидимому для экваториальных стран C ближе к 0°, чем для стран более северных, для зимы дальше от 0°, чем для лета, а потому я и считаю (см. протокол 7 октября), что ныне еще нет „возможности узнать изменяется ли C с географическою широтою, с временами дня и года“. Узнать это мне кажется интересным, а потому я предлагаю (см. протокол) способы, которые считаю для того наилучшими.

Вот сущность того сообщения (7 октября 1875 г.), которое под сдержанным заглавием „Некоторые замечания" аттаковал г. Рыкачев на всех пунктах, начиная с мелочей и кончая существенными сторонами вопроса. Вследствие недоказательности опровержений, я бы не стал отвечать на них, если бы мое сообщение 7 октября не было моим первым метеорологическим трудом. Не имей кроме того М. А. Рыкачев ученого имени, как метеоролог, я конечно также не стал бы отвечать на „Некоторые замечания" и предоставил бы дело суду времени и ученых, интересующихся метеорологическими вопросами. Но в виду указанных обстоятельств и вследствие недостаточности у нас ученой литературы поднятого вопроса, мне кажется необходимым ныне же отвечать помощнику директора нашей главной метеорологической обсерватории, г. Рыкачеву; при этом я постараюсь воздержаться от всяких недомолвок, следы которых, по моему мнению, не должны иметь места в ученом разноречии. Цель моя — защита, но не личная, а защита того простого вывода, который я считаю новою опытною истиною, *удовлетворяющею времени*, выведенною из данных, не мною добытых. Если бы я считал свои выводы (1 и 2) абсолютными—я не стал бы продолжать разработку вопроса, что сделал уже в сообщениях 4 ноября и 2 декабря в Физическом Обществе, не предложил бы способов проверки (7 октября).

Прежде всего необходимо обратить внимание на то, что г. Рыкачев не ждал моей статьи, а довольствовался кратким рефератом, помещенным в протоколах. Это льстит мне, показывая, что и столь опытный метеоролог, как г. Рыкачев, нашел в моем сообщении что-то, достойное его внимания. Но в то же время мне остается непонятным, почему г. Рыкачев столь много говорит о мелочах таких, как фотографическая карточка Глешера вместе с Коксвелем в корзинке аэростата, или таких, как вопрос о физическом значении C, или о наблюдениях, столь мало удовлетворительных, как наблюдения Захарова и т. п.? Кажется как будто бы г. Рыкачев защищает себя или Глешера, но я на них обоих вовсе не нападаю, или же г. Рыкачев впал в несообразность, напрягая усилия на мелочные стороны, когда мог ограничиться только моими основными положениями (1 и 2). Не желая впасть в ошибку г. Рыкачева и в то же время не желая оставить без ответа ни одного из сделанных им возражений, я разделяю ясно мелкие его возражения от существенных и начну с ответа на первые.

Мою заметку о том, что „термометр у Глешера находился в лодке между наблюдателем и аэронавтом, а потому вероятно давал, особенно в высших слоях, температуру бо́льшую, чем действительная" (протокол 7 октября) г. Рыкачев назвал „неосновательною", потому что, „термометр помещался большею

частью вне лодки, как об этом говорит Глешер в примечании к наблюдениям 30 июня и как видно на фотографической карточке, снятой с аэронавтов при этом поднятии". Эту карточку г. Рыкачев в декабрьском заседании Физического общества показывал его членам. Карточки этой я ранее того не видал, а имею отчет Глешера и изображение (впрочем, кажется, сколько я мог видеть, тождественное с карточкою) Глешера в корзине с инструментами, стоящими между ним и Коксвелем, в книге, доступной каждому, и где статья о путешествиях Глешера написана им самим. Книга эта довольно известна, переведена и на русский язык: „Voyages aëriens" (Paris, Hachette, 1870). На стр. 17 этой книги [1] видны и Глешер, и Коксвель, и инструменты, между ними помещенные. Последние представлены здесь (как и на фотографическом изображении г. Рыкачева), стоящими на доске, но изображения мелки и нельзя разобрать, где находятся термометры, хотя очевидно, что все инструменты помещены внутри, а не вне корзинки, *ни один не выдается за борт,* хотя края доски и находятся за ним. Но к стр. 38 того же издания приложен подробный и ясный рисунок доски со всеми инструментами. На рисунке этом и в тексте стоит ясно, что обыкновенных сухих термометров было три: один слева с краю (№ 1), другой справа (№ 8) почти посередине доски (чувствительный термометр) и третий (минимальный термометр № 22) как раз на середине доски. Несомненно, что г. Рыкачев ошибочно считает один из термометров „за бортом корзинки". [2] Такого не было и быть не могло, потому что не было средств читать, сидя на месте, показание термометра, бывшего за бортом. Для этого должно было бы иметь отчетную трубу, которой не имелось, или для этого должно было бы вставать с места, чего также не делалось. Отчет производился лупою. Не будь упомянутой выше карточки и соответствующих рисунков, можно было бы подумать из слов Глешера (Repp. of the Brit. Assoc., 1862, p. 380: „the instruments were placed on a framework ... so as to be beyond the influence of the occupants of the car"), которые цитирует г. Рыкачев, что термометры были помещены выгоднее, чем было в действительности, но веря г. Рыкачеву, я должен думать, что ранее термометры были еще в менее выгодной позиции, потому что рисунок оказывается снятым 30 июля 1872 г., к которому относятся и цитированные слова Глешера. Итак, термометры были в корзине, а не за ее бортом, что и требовалось доказать. Впрочем это мелочь. Пусть все термометры были за бортом, все-таки их

[1] В русском переводе рисунок этот пропущен.

[2] Сличи стр. 407 отчета Глешера (1862), примечание (20) „agitated bulb thermometer over side of the car", т. е. термометр (20 августа 1862 г. в 8 ч. 5 м. веч.) был экстренно вне корзинки. Следовательно — ординарно он был внутри корзинки.

наблюдали лупою, приближая руку и нагревая чрез то термометры.[1] Это несомненно и, следовательно, несомненно существование той устранимой погрешности, которую заключают „драгоценные", как я продолжаю утверждать, данные Глешера. Не упрек и не намек хотел я сделать Глешеру, я указал только то, что необходимо принять в расчет при разборе его наблюдений.

Второе мелочное обстоятельство, которое обратило на себя внимание г. Рыкачева, есть „физическое значение" (мои слова из протокола 7 октября) числа *C*. Он считает, что *C* не может выражать температуры *верхнего* слоя атмосферы и многократно возвращается к этому в своих „замечаниях". На это, прежде всего, отвечу, что я никогда не считал *C* за температуру небесного пространства или верхнего слоя атмосферы, напротив того, я предостерег других придавать *C* это значение, — говорю даже, что „понятие о температуре небесного пространства есть „фикция", и ясно выражаюсь, что „физическое значение *C* есть то, что оно показывает температуру того слоя атмосферы, где давление *близко* к нулевому" и „что близ нулевого давления могут быть иные перемены температуры". Далее я говорю, что „численному значению *C* нельзя придавать абсолютного значения, тем более, что известны случаи низшей температуры". Все это вмещено в тот протокол, который напечатан в ноябрьской книжке „Журнала Физ. Общ."[2] и который я сам доставил еще в октябре г. Рыкачеву. Как же объяснить при этом то, что мне г. Рыкачев замечает по отношению к температуре *верхнего слоя* атмосферы? Я думаю, что для этого довольно двух предположений. Первое из них состоит в том, что г. Рыкачев читал в единственном числе (верхний слой) то, что я пишу во множественном (верхние слои). Сообщение мое озаглавлено „О температуре верхних слоев атмосферы". Если его прочесть в единственном числе: „о температуре верхнего слоя атмосферы" — тогда замечания г. Рыкачева будут понятны; тогда покажется, что я определяю эту температуру в —36° Ц., и он считает это невероятным, мою статью неразумною, спешит, как истинный ученый, предотвратить других от заблуждения, в которое я впадаю, потому что верхнему слою нельзя, дескать, придать температуры —36°, а надо что-нибудь пониже. Хотя эта гипотеза находит себе много подтверждений в „замечаниях" г. Рыкачева, но я смею думать, что начало протокола, где определено значение того термина, который я применяю („верхними слоями я называю те, которые частью удалены от земной поверхности", не лучше было бы сказать

[1] Не смею думать, что возражение г. Рыкачева относилось к одному моему слову „между", потому что тогда было бы нельзя сказать, что Тверь лежит между Москвою и С.-Петербургом — в самом деле, прямая, соединяющая центры этих городов, не проходит через Тверь, а ниже ее и сбоку.

[2] Она вышла в свет, как значится на обертке, 6 ноября 1875 г.

„те, которые не касаются земли"?), прочтено г. Рыкачевым, а потому считаю вторую гипотезу более вероятной. Вторая гипотеза, могущая объяснить то обстоятельство, что г. Рыкачев столь часто возвращается к понятию о температуре верхнего слоя,[1] состоит в том, что под словом „физическое значение" г. Рыкачев подразумевает; „реальное значение". Может быть кто-либо другой считает эти понятия тождественными, но отнюдь не я принадлежу к числу их и со мною вместе многие физики и геометры. Приведу объясняющий пример. Физическое значение коэффициента упругости (т. е. коэффициента пропорциональности упругих удлинений с нагрузкою) часто, даже почти во всех курсах физики и механики, определяют, говоря, что это есть груз, способный удвоить длину прута (коего сечение = 1, напр. 1-му кв. миллиметру). Но при этом всякий знает, что такое упругое удлинение выдержат только немногие из известных тел. Реальности это понятие не имеет, а физическое понятие все-таки приводится, так сказать, для ясности.

Точно также величине $\frac{1}{\alpha}$ придают физическое значение — абсолютного нуля температур, но едва ли кто-либо решится утверждать, что при какой-либо температуре тело не будет занимать никакого объема, хотя по формуле $v = \left(\frac{1}{\alpha} + t\right)$ и следует, что при $t = -\frac{1}{\alpha}$ величина $v = 0$. Физическое понятие об абсолютном нуле оказывается удобным, выгодным, а реальности оно никакой не имеет. Таково же понятие об электрических жидкостях. Правда, что нередко хлопочут о реализации некоторых физических понятий, но я не заявлял себя смешивающим *фикцию* с природою. Конечно, лучше было бы изобресть какое-нибудь условное, хоть бы греческое, слово для многих физических понятий, подобных вышеуказанным фиктивным физическим понятиям, тогда бы и новичок в физике не стал бы путаться понятиями об абсолютном нуле, электрических жидкостях и т. п.; знал бы, что эти понятия только уясняющие, сокращающие, но, к сожалению, такого слова еще не изобрели, а потому мне приходится вести об этом речь, отвечая г. Рыкачеву. Впрочем, я излагал дело в Физическом Обществе и в протоколах его, подразумевая, что дело будет понято специалистами. В подробной статье я конечно объясню смысл постоянства величины C с большею ясностью, а потому и сожалею о том, что г. Рыкачев после

---

[1] О верхнем слое атмосферы я нигде в своей статье ничего не говорю, потому что связываю с ним понятие о границе атмосферы. Кстати сказать, самое существование *верхнего слоя* (т. е. границы) атмосферы, признаваемого многими учеными, сомнительно, хотя и имеет некоторую вероятность. Я высказываюсь в другом месте за него („Об упругости газов", I).

шил написать свои замечания ранее появления моей подробной статьи. [1]

Помимо указанных здесь гипотез — я ничем другим не могу объяснить того обстоятельства, что мой оппонент приписывает мне выводы, относящиеся до температуры верхнего слоя атмосферы: я их не делал — они целиком принадлежат самому г. Рыкачеву, [2] а по этой причине я и не стану более ни слова говорить о замечаниях, сделанных мне г. Рыкачевым относительно температуры верхнего слоя атмосферы. Эти замечания я считаю происходящими от недоразумения, которого я не возбуждал. [3]

---

[1] Так как в нее я считаю удобным включить и теорию вопроса (заседание 4 ноября) и некоторые другие близкие вопросы (заседание 2 декабря), которые еще продолжают меня занимать, то изложение этой подробной статьи (после того, что пишу теперь) я откладываю на некоторое время, вероятно до лета.

[2] Может быть, кто-нибудь скажет, что нет различия между понятием о верхнем слое и понятием о том слое, где есть некоторое давление, близкое к 0. Таким замечу, что слой есть понятие геометрическое, определяемое размером, толщиною. От верхнего слоя до того, где есть некоторое давление, близкое к нулевому, например, хотя бы давление $= {}^1/_2$ англ. дюйма, расстояние может быть или весьма громадное, больше чем от поверхности земли до того слоя, где давление $= {}^1/_2''$, или даже это расстояние может быть бесконечным (если не принимать границы атмосферы). Оттого-то я и говорю „близ нулевого давления могут быть иные изменения температур" (см. протокол 7 октября). Скажу определеннее, хотя и могу за то подвергнуться новым замечаниям: при $H = 0.''5$ может быть $t = -32°$ Ф., а в верхнем слое, в котором среднее давление примем хотя бы $H = 0.''001$, температура может быть будет $-500°$ Ф., т. е. близкая к температуре абсолютного нуля. Для уяснения дела прибавлю сверх того, что тот, кто попробует применить гипсометрические формулы для определения расстояний от земли ($H = 30''$) до слоя, где $H = 0.''5$ и отсюда до слоя где $H = 0.''001$, увидит ясно различие верхнего слоя от того слоя, где в пределе аэростатических наблюдений давление близко к нулевому. Замечу еще, что я говорю: „C на экваторе вероятно выше, чем у полюсов и т. д.", т. е. ясно, что не имею в виду ни точного постоянства, ни температуры небесного пространства.

[3] Очень характерно сличить то место „Некоторых замечаний" г. Рыкачева, где он говорит „...мы бы получили невозможный вывод, что температура верхнего слоя атмосферы выше температуры земной поверхности", с словами моего протокола, где сказано „...нельзя доверять эмпирическому выводу ($C = -36°$Ц), тем более, что известны случаи низшей температуры воздуха". Здесь видно, что г. Рыкачев читал и не понял мой протокол, хотя простоместами его перефразировал. Если слова „верхний слой" понимать так, как я условился понимать в начале протокола (верхние слои и суть те, которые не касаются земли), то перифраз г. Рыкачева совершенно неверен, потому что многие аэронавты наблюдали в воздухе местами вверху высшую температуру, чем внизу. Так замечаем это у Глешера, напр. в том восхождении 12 января 1864 г., которое г. Рыкачев неверно относит к числу правильных и поучительных. То же недавно наблюдалось (29 ноября 1875 г.) Тиссандье (высота $z = 0$, $t = -2°$; $z = 1200$ м, $t = -3°$; $z = 1776$ м, $t = +1°$, пройдено облако). Но, и не летая в аэростате, в своей обсерватории г. Рыкачев (Летопись Главной физической обсерватории, 1873, стр. 8 и приложение, стр. 116) может узнать, что в октябре в Петербурге слой воздуха „($t = 6.°4$) теплее" земной поверхности

Третье несущественное обстоятельство, о котором мне приходится сказать, выражается словами г. Рыкачева: „Наблюдения, принятые в расчет г. М., недостаточны для вывода эмпирического закона". Вслед затем у г. Рыкачева говорится, что лучших (в ясную погоду и правильных) высоких восхождений Глешера четыре (см. об этом далее) и что из них я „воспользовался только двумя". Здесь ошибка, конечно, не преднамеренная, но тем не менее ошибка не моя, а г. Рыкачева. Я расчел все (даже непригодные к моему выводу, напр. 20 июня 1864 г.) наблюдения Глешера, не говоря о наблюдениях других аэронавтов и не только сказал о том в заседании 7 октября, где г. Рыкачев присутствовал, но даже на то есть указание и в протоколе. Так, в нем сказано: „*Для примера* г. М. указал на два из высших и на два из невысоких восхождений". Далее говорится, что „*общее среднее*[1] для лучших данных Глешера есть $C = -32.°5\,Ф$". Следовательно г. Рыкачев не имел основания, даже не дожидаясь подробной статьи, обвинять меня в недостатке взятых мною для расчета данных. Не смею предположить при этом, что недостаток заключается в отсутствии данных, полученных г. Рыкачевым в его воздушном полете, потому что эти данные нельзя признать заслуживающими расчета уже по одной отрывочности их описания, а главное—по той незначительной высоте, до которой происходило поднятие аэростата с г. Рыкачевым, потому что сам г. Рыкачев говорит о том, „что наибольшее значение надо придать самым высоким поднятиям". В этом он согласен со мною, потому что выведенная мною формула для погрешности в определении C заключает в знаменателе разность предельных давлений, а эта разность для невысоких поднятий мала, следовательно тогда погрешность в C велика. Итак, я должен спросить теперь г. Рыкачева: в чем же

($t = 6.°25$), а потому ясно: 1) что г. Рыкачев понимает под словом „верхний слой" совершенно не то; что я условился называть этим словом, и 2) а потому существующее считается *невозможностью*. Замечу при этом еще, что три указанных примера, в которых с поднятием замечается повышение температуры, — относятся к холодному времени года. Я не утверждаю, что всегда можно ждать зимою повышения температуры при поднятии, но не вижу невозможности такого явления, а потому и постараюсь, когда получу возможность, в наши сильные холода узнать ход температуры с поднятием вверх. Мне известно, однако, что на горах в Альпах зимою холод не спускается ниже —25° Ц. (примерно, по отчету наблюдений Альпийского клуба). Нельзя не выразить желания, чтобы чаще помещались на высотах гор минимальные термометры, как это делают члены Альпийского клуба. Задача интересная для тех, кто любит горы и часто восходит на высокие. Особенно важно было бы сделать соответственные наблюдения на Кавказе и на высоких горах наших азиатских владений, поместив на вершине и близ подошвы на всю зиму минимальные термометры.

[1] Причем ясно, что не одни четыре примерные восхождения были для того взяты, ибо среднее для этих четырех $C = -31.°7$, а не—$32.°5$.

состоит „недостаточность" принятых мною данных: в недостаточности ли высоких восхождений при разных обстоятельствах, или в том, что я некоторые высокие восхождения не принял в расчет? Причем замечу, что помимо старых наблюдателей я принял в расчет Вельча и Глешера, Тиссандье и погибших Севиля и Кроче Спинелли. Буду очень благодарен, если укажут мне те, которых я во внимание не принял.

Из несущественных замечаний г. Рыкачева мне остается последнее, касающееся восхождения Захарова из С.-Петербурга 1804 г. 30 июня. О нем в протоколе 7 октября я сказал, что оно „не противоречит предположению о постоянстве величины C", а г. Рыкачев говорит, что „наблюдения г. Захарова противоречат моим выводам" и это подчеркивает. На это необходимо сказать прежде всего, что данные Захарова не могут говорить противу того, что C близко к постоянной величине —32° Ф. или —29° Р. Это можно видеть из чисел, полученных Захаровым,[1] которые г. Рыкачев выписал для ясности все (см. его „Некоторые замечания"). Они гласят, что наблюдения сделаны были только при подъеме и притом очень неравномерном, сверх того вечером. Первое наблюдение $H_0 = 30''$ в 7 ч. 15 м., последнее при $H_1 = 22''$ в 9 ч. 30 м; $t_0 = 19°$, $t_1 = 4.°5$. Г. Рыкачев сам знает, что в Петербурге 30 июня часто от $7^1/_4$ до $9^1/_2$ ч. вечера температура меняется на 2—3 и более градуса. Примем же, что в 1804 г. 30 июня от $7^1/_2$ до $9^1/_2$ ч. вечера температура убыла на 2.5° Р.[2] Тогда, значит, в $9^1/_2$ ч. в Петербурге, где $H = 30''$, должно принять $t_0 = 19°$ Р.—2.°5 Р. = 16.°5 Р., а над Петербургом в то же время, где $H_1 = 22''$, Захаров наблюдал в то же время $t_1 = +4.°5$ Р. Вопрос состоит в том: противоречат ли данные Захарова с выводом, что $C = -29°$, или нет?

Посмотрим: $C = \frac{t_1 H_1 - t_0 H_1}{H_0 - H_1} = \frac{4.5 \cdot 30 - 16.5 \cdot 22}{30 - 22} = -28.5$; полученное число даже чрезвычайно близко к числу, полученному мною из данных Глешера (—29° Р.), и будь я поспешен в суждениях и выражениях, я бы смел сказать, что они подтверждают вывод, вытекающий из данных Глешера ($C = -32.°5$ Ф. $= -29°$ Р.), но я не делаю этого потому, что данные Захарова из рук вон плохи: нет ни полноты, ни даже единовременных наблюдений в Петербурге, даются только целые, да половины градусов Реомюра, показания барометра не редуцированы на температуру, нет уверенности в вертикальности барометрической шкалы

[1] Очень характерно, что числа Захарова явились в изданиях Академии Наук только через два года (на русском только языке) после полета, а в анналах Гильберта на немецком языке очень скоро после полета.

[2] Для убеждения может служить „Летопись" нашей обсерватории и даже статья г. Рыкачева в „Календаре Суворина" на 1866 г. Для июля здесь дана для ясных дней разность от $7^1/_4$ до $10^1/_2$ часов, равная 2.°8 Ц. или 2.°24 Р.

и т. д. Допустив, что здесь $\Delta(t)$ погрешность в (t) не более $= \pm 0.5°$ Р., а погрешность в давлении не более $\Delta(H) = \pm 0''.1$ (наверное в действительности у Захарова они были больше), оказывается, что для выгоднейшего случая (предельных наблюдений) погрешность в C по крайней мере $= \pm 4°$ Р. Следовательно, данные Захарова нисколько не противоречили бы выводу о постоянстве C, если бы они даже дали (для предельных наблюдений) вместо $C = -29°$ Р. величину C от —24 до —33° Р. Полученное число $C = -28.°5$ очевидно не противоречит тому, что я вывожу из наблюдений Глешера, что и требовалось доказать. Но все же это несущественно, потому что г. Рыкачев просто не обратил внимания на разность времен наблюдений, не сделал расчета о степени точности наблюдений, упустил из виду, что наблюдения столь неполные, как Захарова, вообще не могут противоречить самым лучшим наблюдениям, наконец, забыл, что сказал сам немного ранее: „наибольшее значение надо придать самым высоким поднятиям", а потом придал значение очень невысокому поднятию Захарова. Я упомянул о нем потому однако, что оно имеет исторически весьма существенное значение: оно было первое, чисто ученое путешествие с целью изучения верхних слоев атмосферы. Гей-Люссак поднялся — два месяца спустя, и мы должны гордиться тем, что первое чисто метеорологическое поднятие совершено русским ученым и из Петербурга, хотя не можем похвастаться результатами, полученными нашим первым русским воздухоплавателем. Напомним однако, что и Гей-Люссак дал не стройные результаты, хотя и гораздо более полные, чем Захаров.

После ответа на несущественные, могу сказать, мелкие „замечания" г. Рыкачева, я перехожу к крупным, существенным. Если бы в каждом из предыдущих г. Рыкачев был прав, я еще не был бы виновен, потому что была бы надежда на исправление в подробной статье, и потому еще, что статья моя трактует не о способе установки приборов в корзинке Глешера, не о температуре „верхнего слоя", не о наблюдениях Захарова — она доказывает, что лучшие наблюдения Глешера выражаются прямыми линиями, какие представляют формулы (1) и (2). Следовательно существенными возражениями я должен считать те из сделанных мне г. Рыкачевым, которые направлены к тому, чтобы это опровергнуть. Из „Замечаний" г. Рыкачева можно извлечь три нижеследующих существенных возражения этого рода.

1) „Способ вычисления моих результатов" г. Р. считает „сомнительным", не объясняя поводов сомнения, но приводя свои способы обработки наблюдений Глешера, конечно, г. Рыкачев желает показать, как должно было начать и продолжать извлечение результата. Для суждения о том, как извлекал я свои

результаты, в протоколах есть только краткая заметка,[1] но в заседании 7 октября я объяснил довольно подробно свой способ вывода, который в одном примере (для 5-го сентября 1862 г.) должен явиться в написанной мною (краткой) несколько тому времени назад французской статье. Обыкновеннейший способ, которым я производил большинство расчетов, я объясняю далее здесь над одним примером, 31 марта 1863 г. Читатели „Замечаний" г. Рыкачева и этого моего ответа могут затем судить, какой из способов самого начала расчета, мой или г. Рыкачева, заслуживает предпочтения. Графические приемы, какими пользовался г. Рыкачев для получения основных чисел (см. его табл. 1 и 2), служивших для дальнейших расчетов, применялись и мною, но только как пособие для проверки численных выводов, а не служили исходным приемом, как у г. Рыкачева. Желая сгруппировать в одно место все существенные возражения г. Рыкачева, я буду продолжать их перечисление и только затем обращусь вновь к способу, употребленному мною для расчета.

2) К рубрике „сомнительных способов извлечения результатов" г. Рыкачев повидимому (из его „замечаний" и особенно ясно из его устного изложения в декабрьское заседание Физ. Общ.) относит то обстоятельство, что расчеты свои (зависимость t от H) я произвожу по прямой, а их лучше делать по кривой, напр. по параболе, как то делал Гершель и ныне делает г. Рыкачев, потому что „нет никакой причины отдать предпочтение той (эмпирической формуле), которая дает бо́льшую вероятную[2] погрешность (из замечаний г. Рыкачева), а например, для 5 сентября прямая дает погрешность $\pm 1.°10$, а парабола $\pm 0.°99$ Ф. Это замечание составляет центр возражений г. Рыкачева и мне необходимо сделать общее отступление, чтоб сократить ответ.

Всякий приступающий к разработке вопроса, в котором играют роль многие наблюденные числа, всегда приводит их в систему, подвергает эмпирическому расчету и старается, *если есть возможность*, найти из них прилагающийся к делу закон или зависимость чисел между собою. Так поступают во всех отраслях точных знаний, так поступали по отношению к температурам воздушных слоев и Глешер, и Лаплас, и Био, и Ковальский, и множество других. При этом приходится весьма часто иметь много чисел, и если желательно из них извлечь эмпирический закон, то необходимо, чтоб он применялся *ко всем* исправленным (если то возможно), избранным за достоверные,

---

[1] Сказано однако: „взяв средние из нескольких соседних наблюдений и соединяя показания при подъеме и опускании".

[2] При этом надо подразумевать среднюю вероятную отдельного наблюдения или среднюю квадратическую погрешность.

данным, *в пределе возможных в них погрешностей*; если этого не сделано—еще и нет эмпирического закона.

Если сегодня для выражения зависимости t от H годится функция $t=f(H)$, а завтра $t=F(H)$ и сколько дней, столько и новых, ничем не связанных функций — закона нет и следа, есть только алгебраическое упражнение в решении уравнений, ибо всякий ряд для чисел t и H можно связать какою-либо функциею. Более или менее расширяя пределы возможных погрешностей, можно из n данных переменных (напр. t и H) вывести уравнение $t=f(H)$ или линейное, или параболическое, 2-го порядка или параболическое $n-m$-го порядка, или же логарифмическое, или какое-либо другое трансцендентное. Если рассчитывать по параболе $n-1$-го порядка, то все наблюдения выразятся совершенно точно. Но даже такое, совершенно *точное*, алгебраически, выражение не будет иметь никакого значения, если нет никакой зависимости между функциями, получаемыми при каждом расчете.

Вот то общее, весьма элементарное, отступление, которое, к сожалению, мне приходится сделать, отвечая г. Рыкачеву. Есть или нет потребности отыскать эмпирический закон распределения температур в слоях воздуха? Всякий ответит есть, и что такой закон желателен, но его нет. История дела показывает множество сделанных попыток. Чаще всего пытались подвести данные под эмпирический закон:

$$t_i = t_0 - kZ_i \text{ или } = t_0 - k \lg \frac{H_0}{H_i},$$

где Z есть высота того места, где наблюдены H_i и t_i над тем местом, где даны H_0 и t_0. Важнейшую заслугу Глешера составляет не подлежащее никакому сомнению, новое (после Гей-Люссака) опытное доказательство, что этот закон неприменим для больших поднятий и что k изменяется при разной погоде.

Или должно опровергнуть новыми наблюдениями данные Глешера, или необходимо отвергнуть вышеуказанный закон, долго до того стоявший твердо. После Глешера и поныне еще многие держатся этого закона, да и сам Глешер не может освободиться от него совершенно, расчеты свои производит и сводку делает, выставляя зависимость t от Z. Если вместо простого закона $t_1 = t_0 + KZ_i$ поставить[1] формулу $t_i = t_0 + aZ + bZ^2 + cZ^3 + \ldots$, то очевидно возможно выражать ею всякий ряд наблюдений, но это не будет закон, это будет — алгебраическое упражнение в решении уравнений, если не найдется зависимости коэффициентов a, b, c . . . друг от друга и если они меняются

[1] В пределе малых высот его конечно можно смело применять и в настоящее время.

от одного раза до другого. Можно, например, для каждого восхождения Глешера разыскать зависимость $t=a+bf+cf^2+$ $+df^3+\ldots$, где f есть наблюдаемое число — хоть бы ударов пульса аэронавта, или хоть показание озонометрической бумажки, или хоть отчет барометра — это все можно сделать, и если дано n наблюдений, то наверное выражение $a+bf$ будет давать большую среднюю вероятную погрешность, чем $a+bf+cf^2$, а выражение $a+bf+cf^2+\ldots+mf^{n-1}$ будет совершенно точно выражать все данные. Этого не надо доказывать тем, кто помнит алгебру и понимает, как находятся и в чем состоят эмпирические законы природы. Они необходимы для полного обладания предметом, а потому их и разыскивают. Оттого и я разыскивал в данных Глешера эмпирический закон. Ведь не случай же управляет температурами слоев воздуха, не зря распределены они в слоях атмосферы? Сложны оказываются некоторые наблюдения, где дул переменный ветер или было много облаков. Избираются те, где ожидается простейшая законность, и она нашлась для этих случаев, хотя и не нравится г. Рыкачеву. Он из 19 графически полученных данных 5 сентября выводит, что выражение $t=a+bH$ [1] дает среднюю вероятную погрешность $\pm 1.^\circ 1$ Ф., $(=\pm 0.^\circ 61$ Ц.), и потому считает это выражение не верным, что оно должно быть заменено выражением $t=a+bH+cH^2$, ибо при нем средняя вероятная погрешность $=\pm 0.^\circ 99$ Ф. $(=0.^\circ 55$ Ц.). Да отчего же не употребить уравнение 18-ой степени? Оно даст погрешность еще меньшую, а именно ± 0.0000? Если взять три наблюдения, то парабола 2-го порядка будет совершенно точна. Возьмем же для 5 октября (из чисел графических найденных г. Рыкачевым, см. его табл. 1) три [2] далеко и равно отстоящих:

$$H_0=27'',\ t_0=51.^\circ 4;\ H_1=20'',\ t_1=30.^\circ 2;\ H_2=13'',\ t_2=9.^\circ 0.$$

Что же мы видим? $H_0-H_1=7$; $H_2-H_1=7$; следовательно разности давлений одинаковы. Чтобы узнать, которое из выражений $t=a+bH$ или $t=a+bH+cH^2$ годится для выражения законности, должно взять t_0-t_1 и t_1-t_2; если эти величины будут равны между собою, ясно, что линейное выражение достаточно, если они близки, в пределе возможной погрешности, то и тогда такое выражение удовлетворительно; но к выражению параболическому необходимо перейти, если разности температур вы-

---

[1] В подлиннике очевидно опечатка „$a+bt$". (*Прим. ред.*)

[2] Выбор трех чисел из таблицы I г. Рыкачева делаю, как следует делать,— на основании разбора данных и требований дела. Для $H=29''$ и $28''$ не беру, потому что сам г. Рыкачев не берет такие близкие к земле данные, идя при этом вслед за моим предложением; не беру и крайние низшие для $H=11''$ и $12''$ — они сомнительны (см. далее), а беру наиболее друг от друга удаленные и равно отстоящие.

дут более различными, *чем двойная возможная* в опыте погрешность. Разность $t_0 - t_1 = 21.2$, а разность $t_1 - t_2 = 21.2$ — т. е. без малейшей погрешности для взятых чисел приложимо линейное уравнение, какое я и прилагаю. Из того, что разность температур = 21.2°, а разность давлений = 7′, следует тотчас, что:

$$t_i = a + \frac{21.2}{7} H_i \text{ или } t_i = a + 3.029\, H_i$$

и далее, что величина a, означаемая мною чрез букву C, равна — — 30.4 (я даю в протоколе = —32.9).

Чтоб вывести a и b из многих данных, затем должно прибегнуть к способам, даваемым теориею вероятностей, но нет никакой нужды прибегнуть к приему, даваемому г. Рыкачевым.

Предполагая, что читатель далее сам разберется в этом вопросе, а если не пожелает, подождет моей статьи, я считаю относительно разбираемой стороны вопроса необходимым оставить пока г. Рыкачева в стороне с его приемами расчета, а остановиться лучше на тех приемах, какие можно применить для нахождения погрешности, возможной[1] в наблюдениях Глешера. Погрешности были и в H, и в t, но очевидно, что возможно говорить о погрешности только в t, если выражать t как $f(H)$. Чтобы найти возможную погрешность данных чисел, нужно знать одно из трех: 1) или все отдельные возможные влияния на результат наблюдения, 2) или истинный закон, которому следуют наблюдаемые числа, 3) или погрешность при повторении опыта. Первый прием здесь неприменим. Может показаться, что и второй прием здесь неприменим, ибо закон неизвестен, а разыскивается, но допустим, что $t = a + bH$ или $t = a + bH + cH^2$, в том и другом случае легко найти возможные погрешности и их полезно сличить.

Но однако этот путь сомнителен и длинен. Третий чаще всего применяется, применим и здесь. Он всегда дает погрешность *ниже возможной*, потому что некоторые погрешности (напр. приборов, личные и т. п.) повторяются с тем же знаком. Половина наибольшей, встречающейся при повторении, разности результата (по возможности исправленного) наверное будет менее возможной погрешности наблюдения. Возьмем, напр. (см. далее таблицу данных 31 марта 1863 г.), одно из восхождений Глешера и заметим, что при перемене давления на 1″ темпера-

---

[1] О значении возможной погрешности для отыскания эмпирических законов часто мало размышляют, а потому я счел необходимым сказать г. Рыкачеву об этом предмете в устном возражении в декабрьском заседании Физического общества. Тогда у г. Рыкачева не было речи даже и о расчете вероятной (т. е. точнее средней квадратической) погрешности, но в „Некоторых замечаниях“ говорится об этой последней. Оба эти рода погрешностей (возможная и вероятная) весьма различны, что иногда понимают многие не ясно.

тура вообще меняется оксло на 2.°4,[1] найдем, какие числа отвечают давлению в 15 дюймов при подъеме.

Из последнего столбца видно, что здесь наибольшее различие 11.0 — 7.5 = 3.°5 Ф., наибольшее же различие от среднего вывода (9.°5) достигает 2°Ф. Эти различия очевидно зависят не от разности времен, не от способа движения (подъем и опускание), но от некоторых неопределяемых данными влияний, а поэтому составляют *возможную погрешность*, которую исправить и устранить нельзя.[2] В других случаях возможная погрешность, определяемая тем же путем, гораздо больше. Здесь можно принять ее = 1.°6 Ф. и даже 2°, в других случаях она достигает до 3, 5.°7 Ф. В подробной моей статье это будет доказано. Очевидно далее, что в тех случаях, когда повторения наблюдений нет, все же необходимо допустить возможную погрешность и суждение о законности должно делать только в пределах возможных погрешностей, а потому, если данные 31 марта 1864 г. дадут отступления от закона не более 2° Ф., они подтвердят закон. Выражение закона принять будет возможно, если даже получатся и бо́льшие отступления, когда вывод имеет качество закона, т. е. применяется не к одной данной совокупности чисел, а ко всем известным лучшим наблюдениями в пределе возможных погрешностей, и если значительные отступления изменяются неправильно — ибо тогда ясно, что это влияние случайностей, а не природы явления.

Из того, что 31 марта 1863 г. во время	было давление в англ. дюйм.	по наблюденным температурам Ф.	следует, что при давлении 15" наблюденные температуры около
1 ч. 47 м.	15.63	9.0	7.°5 Ф.
48	15.45	9.0	7.9
49	15.35	8.5	7.7
50	14.96	11.1	11.0
51	15.06	11.0	10.9
58.5.	15.67	12.1	10.5
2 ч. 2 м.	15.36	11.0	10.1
4	14.96	10.5	10.6
6	14.66	9.3	10.1
6.5	14.62	8.2	9.0

Вот путь, которому, по моему рассуждению, следовать должно и которому я следовал во всех тех случаях, где было должно,[3] а потому и при нахождении зависимости t от H. Идя этим

---

[1] Этот коэффициент меняется несколько со временем, но если производимые на основании его поправки менее чем 2°Ф., то это изменение будет влиять только на десятые доли градуса, а не на целые градусы. Данные 11 июля 1863 г., 29 мая 1866 г. и др. представляют много случаев для определения возможной погрешности. Она будет определяться с большею точностью в моей подробной статье.

[2] Взяв среднее из многих чисел, мы устраняем часть из случайных (±) погрешностей, но не все возможные, ибо последние могут быть все с одним знаком. Например, облака, ветер и т. п.

[3] Например, при своих исследованиях о сцеплении жидкостей, о соединении спирта с водой, о расширении жидкостей, о сжимаемости газов и т. п.

путем и попробовав применять функции вида $t = a + bH$ и вида $t = a + bH + cH^2$ . . . , я нашел, что первая составляет закон, общий для всех лучших наблюдений Глешера, а вторую и тем паче параболы высшего порядка не должно вводить в дело, ибо отступления от прямой находятся все и для всех лучших наблюдений в пределах возможных погрешностей.

После этого остановлюсь на последнем из существенных „замечаний" г. Рыкачева.

3) Третье существенное обвинение, возводимое г. Рыкачевым на меня, состоит в том, что замеченная мною правильность не применима к числам, полученным Глешером 5 сентября для давлений низших, чем 13″, а именно наблюденные температуры все ниже вычисляемых по закону прямой линии, проведенной через другие данные того же числа; чтобы это обвинение было основательно, необходимо было привести численное сличение, чего не сделал г. Рыкачев. Но я это делаю далее и показываю тем тот прием, которому следовать необходимо при научном разноречии. Читатель увидит и меру отступлений, и их качество, и вероятно согласится со мною, что для малых давлений 5 сентября 1862 г. данные Глешера согласуются в пределах возможных погрешностей с моим выводом, а не расходятся с ним, и что парабола г. Рыкачева не лучше удовлетворяет делу даже и для этих данных.

Теперь же я покончу с существенными замечаниями г. Рыкачева.[1] К числу их я отношу слова: „Отклонения наблюдаемых величин от прямой, в пределах давлений не ниже 13 дюймов, незначительны, сравнительно с неправильностями от посторонних причин". Сущность этого существенного замечания состоит в том, что г. Рыкачев признает прямую линию за удовлетворяющую наблюдениям для давлений, высших 13″, т. е. соглашается со мною.

Мне остается неизвестным только, относится ли это до одних данных 5 сентября 1862 г., *или вообще до всех лучших восхождений* Глешера? Если г. Рыкачев согласен с последним — то он прямо говорит в мою пользу и тогда мне непонятны мотивы, заставившие его написать все опровергающие замечания, потому что из 28 восхождений Глешера только при следующих пяти (кроме 5 сентября 1862 г.) достигнуты меньшие давления: 1) 17 июля 1862 г. ($H = 11.14''$), но это восхождение не принимает в расчет сам Глешер — так как его данные неравномерны; 2) 18 августа

[1] Если, паче чаяния, я что пропустил из существенных или несущественных возражений г. Рыкачева, он вероятно это не откажется выставить мне на вид. Мне желательно уяснить дело до конца, потому что предмет считаю важным, оттого-то я и стараюсь не оставить ни одного из замечаний г. Рыкачева без ответа. Точно также я прошу и его, если он станет опровергать мой ответ, пройти все мои опровержения.

1862 г. ($H = 12.''71$), но здесь сделано всего 2 наблюдения при давлениях менее 13″; 3) 31 марта 1863 г. ($H = 12.''38$) — эти данные я далее разбираю в виде примера, здесь опять только два наблюдения ниже 13″; 4) 18 апреля 1863 г. — здесь 5 наблюдений от 13″ до 12.″7; 5) 26 июня 1863 г. — здесь также только 2 наблюдения ниже 13″. Всего в сумме вместе с 5 сентября (см. далее) для давлений ниже 13″ достоверных данных у Глешера нет более 12 или 10, а другие воздухоплаватели или не достигали таких высот, или не могли сделать там наблюдений. Получая среднее из подъема и спуска, выйдет всего 7 данных ниже 13″, полученных при условиях такого состояния организма, когда (см. далее) наблюдатель или страдает, или легко теряет сознание, или даже гибнет, как погибли недавно вышеупомянутые два французских воздухоплавателя: Кроче-Спинелли и Сивель, жертвы того стремления в высшие воздушные слои, которое так понятно у естествоиспытателя. Если мой вывод приложим к давлениям выше 13″ — это все, что желать и требовать можно, потому что здесь наблюдений много сот и многие из них могут быть через обработку лишены случайных погрешностей. Если таким образом г. Рыкачев согласен с применимостью прямых линий для выражения лучших данных Глешера для давлений выше 13″ — он напрасно писал всю статью или напрасно не выразил ясно своего со мною согласия для всех наблюдений, кроме тех, которые сделаны при давлении меньше 13″. Но, быть может, он признает применимость прямой линии только для данных 5 сентября 1862 г. — тогда цель его статьи понятна и тогда я должен разбирать его существенные и несущественные возражения, тогда мне следует отдельно говорить о наблюдениях, сделанных 5 сентября 1862 г. при давлениях ниже 13″ и доказать применимость моего вывода для какого-нибудь высокого восхождения,[1]

[1] Г. Рыкачев считает (см. его „Замечания") особенно поучительными из высоких, кроме двух приведенных мною в пример (5 сентября 1862 г. и 31 марта 1863 г.), еще следующие два, совершенные будто бы Глешером в ясную погоду: 18 августа 1862 г. и 12 января 1864 г. Это неверно: у Глешера есть гораздо более поучительные, равномерные и во всех отношениях лучшие восхождения, чем эти два. Восхождение 18 августа 1862 г. обработано в замечаниях самим г. Рыкачевым. Числа заключают значительную погрешность, как видно из одного того, что для двух частей пути, разнящихся всего на 1 час времени, г. Рыкачев получил весьма различные параболы. Это объясняется теми *облаками* и токами теплого воздуха, среди которых пришлось проходить при этом Глешеру (Repp., 1862, pp. 380, 445, 446, 486). Я не знаю того места, где Глешер говорит, что „поднятие 18 августа 1862 г. не оставляет желать ничего лучшего" (относительно конечно правильности в ходе температур, а не формы облаков, которые были так красивы при этом восхождении „king of clouds" и др.), как говорит г. Рыкачев, а если б это и сказал Глешер, — всякий другой, познакомившийся с делом за ним, этого не повторит. Что касается до восхождения 12 января 1864 г., то оно происходило *среди облаков, снега* и *тумана* (Repp., 1864, pp. 269 и 311) и при замечательнейшем *переменном ветре*

Время	Давление, англ. дюйм.	Температура Ф.			Время	Давление, англ. дюйм.	Температура Ф.
4 ч. 11 м.	29.72	49.8	1 группа	1 группа	6 ч. 30 м.	29.89	42.0
14	29.72	49.2			25.5	29.50	35.0
16	29.49	47.5			25	29.06	32.8
17	29.10	47.2	2 гр.	17 гр.	54	28.86	32.2
18	29.60	46.0			23	28.36	31.5
21	26.56	37.5			22.5	28.16	30.9
21.5	26.36	38.5			22	27.96	30.0
23	25.31	37.0			21	27.46	30.0
24	24.82	35.5	3 гр.	16 гр.	20	27.07	29.5
25	24.22	34.3			19	26.87	28.5
27	23.52	33.2			17	26.48	28.2
27.5	23.22	33.0			15	25.57	28.0
28	22.92	32.6			14.5	25.29	26.9
29	22.75	32.1	4 гр.	15 гр.	13	24.77	25.5
32	21.63	28.5			12	24.38	25.1
35	20.63	27.3			11.5	24.18	24.8
40	18.78	21.1			11	23.78	24.2
41	18.33	19.1			10	23.48	23.0
43	17.34	15.1	5 гр.	14 гр.	9	22.78	21.5
44	16.84	14.2			8	22.38	21.2
44.5	16.49	12.2			5	20.97	19.0
46.5	15.95	11.1			6 ч. 2 м.	19.47	14.5
47	15.63	9.0			1	19.28	13.5
48	15.45	9.0	6 гр.	13 гр.	5 ч. 58.5 м.	18.47	12.2
49	15.35	8.5			58	18.27	11.7
50	14.96	11.1			57	17.88	10.8
51	15.06	11.0			56.5	17.37	9.0
58.5	15.67	12.1			56	17.37	8.5
5 ч. 2 м.	15.36	11.0	7 гр.	12 гр.	55	17.17	7.0
4	14.96	10.5			54	16.97	7.0
6	14.66	9.3			52	16.47	7.0
6.5	14.62	8.2			49	16.37	7.2
10	14.27	3.0			47.6	16.17	7.2
16	13.68	2.0	8 гр.	11 гр.	46	16.17	8.0
20	13.18	2.0				16.13	9.1
24	13.38	1.0			43.5	16.13	9.1
25	12.88	0.5			42.5	16.47	9.1
27	12.38	0.5			42	16.37	9.3
31	15.98	3.1	9 гр.	10 гр.	41	16.57	9.1
32	16.09	4.1			38	16.58	11.1
34	16.83	7.5			35	16.88	8.2

кроме 5 сентября 1862 г., что я и делаю далее. Кто потребует большего, тот не откажется подождать моей подробной статьи. Выше исчисленные замечания г. Рыкачева я считаю существенными, ответ на них тоже стараюсь сделать существенным, а потому первоначально разберу (в виде примера) все данные Глешера для 31 марта 1863 г., а потом данные 5 сентября 1862 г. для давлений ниже 13″. Первые данные будут служить моим ответом на 1-е из исчисленных выше 3 существенных возражений, вторые ответят на 3-е существенное возражение, на 2-е же ответил я выше.

Вот все (единовременные для H и t) наблюдения, сделанные Глешером 31 марта 1863 г. (Repp. of the Brit. Assoc., 1873, p. 472).

Для вывода разделим все наблюдения на 17 групп, взяв для каждой по 5-ти ближайших друг к другу наблюдений. Только для 1-й группы, отвечающей наблюдениям близ почвы, оставим два из приведенных Глешером наблюдений и эти последние не станем принимать в расчет. Группы 2—9 отвечают восхождению, 10—17 опусканию. Применяемый затем к каждой группе вывод средних вполне законен, потому что в одной группе нередко числа идут, изменяясь неправильно, показывая, что в обстоятельствах наблюдения не было условий точности и последовательности изменений. Достаточно взглянуть для этого на числа групп 6 и 10. В средних из 5 наблюдений небольшие неровности в качестве данных могут изгладиться. Некоторую часть всякой кривой законно — принять за прямую.

Средние числа наблюдений Глешера 31 марта 1863 г.

Группа	Восхождение			Группа	Спуск		
	Время пополудни	Давление англ. дюйм.	Температура Ф.		Время пополудни	Давление англ. дюйм.	Температура Ф.
2	4 ч. 17 м.	23.67	45.°5	17	6 ч. 24 м.	28.79	32.°5
3	24	24.85	35.°7	16	20	27.17	29.°2
4	30	22.23	30.°7	15	13	24.84	26.°1
5	43	17.55	16.°3	14	9	22.67	21.°8
6	48	15.47	9.°7	13	5 ч. 59	18.67	12.°5
7	5 ч. 0	15.14	10.°8	12	55	17.05	7.°7
8	15	13.83	3.°2	11	46	16.19	8.°1
9	30	14.83	3.°1	10	40	16.57	9.°4

Эти средние числа все же заключают еще, хотя уже меньшие, неправильности (см., например, группы 6, 7, 10 и 12). Особенно

(pp. 197, 313). Глешер его считает не нормальным (1864, p. 275). И такие-то наблюдения считает г. Рыкачев сделанными в *ясную* погоду и хорошими, рекомендует моему вниманию в своих замечаниях. Впрочем об этих восхождениях я стану говорить немало в подробной статье, ибо в них есть свой интерес.

же разительно различие данных, полученных при восхождении и спуске (сравни группы 2, 3 и 4 с 17, 15 и 14). Это зависит не только от разности влияний, действующих при восхождении и спуске, но также, и притом значительно, от разности во времени и месте. Сверх того число наблюдений при данных давлениях (напр. около 15″) не одинаково при подъеме и спуске. Чтоб уменьшить все эти неравенства, я поступаю так: отыскиваю интерполированием для условных давлений — температуры при подъеме и спуске и беру средние из них. Эти средние будут отвечать почти одному времени и одной вертикали. Чтобы найти температуру, отвечающую данному давлению, беру среднее из ближайших наблюдений, соответствующих бо́льшему и меньшему давлениям, поправляя каждое из них, на основании величины[1] Δ, показывающей, какое температурное изменение происходит при перемене давления на 1″. Очевидно, что

$$\Delta = \frac{t_1 - t_2}{H_1 - H^2}.$$

Чтоб найти общее Δ для подъема, замечаю, что группы 2—4 дают $H_1 = 25.25$, $t_1 = 37.^\circ3$, а группы 6—8 дают $H_2 = 14.81$, $t_2 = 7.^\circ9$, откуда для подъема $\Delta = 2.817$; точно так для спуска находим (из групп 15, 16 и 17—9, 10, 11) $\Delta = 2.024$. Руководясь этими числами, находим:

Восхождение				Спуск		
Давление англ. дюйм.	Группы, взятые в расчет	Температура Ф.	Отвечающее время	Группы, взятые в расчет	Температура Ф.	Отвечающее время
27.5	2 и 3[1]	42.°7	4 ч. 19 м.	17 и 16	29.°9	6 ч. 21 м.
25	2, 3 и 4	36.°6	23	16, 15 и 14	25.°9	14
22.5	3, 4 и 5	30.°3	28	15, 14 и 13	21.°0	8
20	4 и 5	23.°8	37	14 и 13	15.°8	2
17.5	4, 5 и 6[2]	16.°4	43	13, 12 и 11	9.°8	5 ч. 57
15	5, 6, 7 и 8[3]	8.°6	5 ч. 2	10 и 9	4.°8	32

[1] Так, напр., по группе 2 имею $t = 45.5 - 2.817\,(28.67 - 27.5) = 42.20$, а по группе 3 $t = 35.7 + 2.817\,(27.5 - 24.85) = 43.17$, принято среднее число $t = 42.^\circ7$.

[2] По группе 4 $t = 17.^\circ38$, по группе 5 $t = 16.44$, по группе 6 $t = 15.42$, откуда среднее $16.^\circ4$. Подобный случай встречается почти во всех случаях, когда взято 3 или более данных: ближайшее наблюдение дает и ближайшее число.

[3] Числа, отвечающие 15″, суть 9.12, 8.38, 10.41 и 6.50. Для давления 12″.5 нельзя взять среднего, должно эксполировать, а потому погрешность в отвечающей температуре будет несравненно более, чем в других числах.

[1] Такой способ вывода из данных носит название регулирования данных наблюдений.

Эта таблица показывает ясно, что изменения температуры в общих чертах совершались правильно как при подъеме, так и при спуске и что температуры зависят не только от перемены слоев воздуха, но и от времени наблюдения; начиная с 4 ч. до 6 ч. 30 м. температура падала как в нижнем,[1] так и в верхнем слоях атмосферы. Взяв среднее для восхождения и спуска, устраним это различие во времени, а также и некоторые другие неравенства данных, получим такие, которые могут служить уже для вывода зависимости изменения температуры с поднятием. Вот эти данные:

Из данных Глешера 31 марта 1875 г.

Давление, англ. дюйм.	Среднее время для подъема и спуска	Средняя температура для подъема и спуска	По формулам A	B
27.5	5 ч. 20 м.	36.°3 Ф.[1]	37.°0	38.3
25	19	31.°2	31.°0	31.9
22.5	18	25.°6	25.°1	25.5
20	20	19.°8	19.°2	19.0
17.5	20	13.°1	13.°2	12.6
15[2]	17	6.°7	7.°3	6.1

[1] Г. Рыкачев (графически) вывел (см. его наблюдение 1).

$H =$	27.5	25	225	20	175.	15″
$t =$	35.°5	31.°0	26.2	20.°0	12.°4	7.4
Погрешность $\Delta =$	−0.°8	−0.2	+0.6	+0.2	−0.7	+0.°7

Я думаю, что графический способ грешит на ±0°.6 Ф. В своем первом расчете для 31 марта 1863 г. я вывел, руководствуясь тем же примером, какой применяю здесь (только разделяя данные на группы по 10 и 5), следующие числа:

$H =$	30	27.5	25	225.	20	17.5	15″
$t =$	44.2	37.1	30.9	24.4	19.0	13.0	6.°8 Ф.

Из них выведено $C = -29{\cdot}2$, как значится в протоколе. Средняя погрешность расчетов (одних расчетов) вообще не менее 0.°5 Ф., что отвечает $\Delta(H) = 005$. $\Delta(t) = 0.3$. Эти величины должно допустить.

[2] В подлиннике опечатка „95°. (*Прим. ред.*)

Средние температуры (3 столбца) по способу наименьших квадратов дают следующий результат для среднего времени 5 ч. 19 м.:

$$t = -28.4 + 2.378\,H \pm 0.°5 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (A)$$

Не подлежит сомнению, что дальше итти в расчет не следует, потому что средняя погрешность ±0.°5 Ф. наверное будет

[1] Наблюдения в Гринвиче дают:

Время	4 ч.	4 ч. 30 м.	5 ч.	5 ч. 30 м.	6 ч.	6 ч. 30 м.
Температура . .	48.°4	47.°5	45.°6	43.°6	42.°4	41.°1
Давление	30.″08	30.″07	30.″07	30.″07	30.″08	30.″08

В 5 ч. 20 м. температура была = 44.°1. На каждые 10 минут времени падение около = 0.°5 Ф.

содержаться даже в регулированных данных, ибо достаточно разности в давлении на 0.2 дюйм. и во времени на 8 мин., чтобы ее объяснить, и вероятная погрешность всех выводов Глешера и Рыкачева не менее этой. Взгляд на основные данные (группы 6—12) Глешера утверждает это с несомненностью. Если бы даже средняя погрешность опыта и расчета была не менее 1° Ф., то и тогда несомненно было бы, что далее итти не следует. Конечно, рассчитывая по параболе, получим большее соответствие между опытом и выводом, но вывод эмпирической законности не должно простирать на погрешности опытов (здесь около 2°, см. ранее) и расчета (около 0.°7), а переходя к параболе, это и придется сделать.[1]

Если вместо постоянного —28.4, как в формуле А, возьмем постоянное, выведенное мною из всех лучших данных Глешера ($c = -32.°5$ Ф.), то получим формулу:

$$t = -32.5 + 2.576\,H. \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \text{(B)}$$

Числа, отвечающие ей, также приведены в предшествующей таблице. По формуле (А) для $H = 30''$ температура $t = 43.°0$, по формуле (В)$=44.°8$. По таблице Глешера (1-я группа) и по данным Гринической обсерватории можно думать, что в 5 ч. 19 м. температура на поверхности земли там, где давление было 30″, около$=44.°6$ Ф., а потому, заменив формулу (А)—формулою (В), мы ближе будем к истине относительно предельных температур. Общая средняя (квадратическая) погрешность формулы (В) $= \pm 0.9$ не превышает тех возможных погрешностей, которые представляют аэростатические наблюдения, в чем можно убедиться из расчетов г. Рыкачева. Впрочем, наблюдения на земле и близ нее напр. ($H = 27.5$) я обыкновенно не принимаю в расчет для вывода, ибо они представляют погрешность, зависящую от влияния земной поверхности, что как бы самостоятельно высказывает в своих замечаниях и г. Рыкачев. Различие формулы (В) от среднего вывода для $H = 27.''5$, составляющее 2° Ф., можно объяснять, если принять формулу (В), тем, что при подъеме (см. отчет 1863 г., стр. 476, 434) даже там, где давление было менее 27″, были облака, туман, а только начиная с 26″ небо было чисто. Эти местные частные условия должны влиять и их нельзя обойти. Это я разовью в моей подробной статье.

---

[1] Наглядное тому доказательство видно в том, что способ расчета, примененный г. Рыкачевым, дает уклонения от истины $\pm 0.°6$ Ф, превышающие погрешности формулы А. Пусть даны три числа y_0, y_1, y_2. удовлетворяющие прямой $y = a + bx$. Допустим погрешность $\mp k$ и пусть наблюдение даст $y_0 + k$, $y_1 - k$, $y_2 + k$. Этим числам точно удовлетворит только парабола $y = a_1 + b_1 x + c_1 x^2$ и a_1 может отличиться от a значительно, если k велико и разность $x_1 - x_8$ мала. Эти элементарные сведения я считаю излишним развивать далее, в них слишком легко разобраться.

Отдельное число, взятое из наблюдений Глешера, представляет по множеству причин, которые я отчасти перечислил в протоколе, мало гарантий точности; в нем могут быть неправильности, местные и временные влияния, доходящие до нескольких градусов Фаренгейта. Это признает и сам Глешер. Разбирая каждый свой полет, он рассчитывает влияние местного отступления в распределении температуры (effect of disturbance) по слоям воздуха. Так, например, для восхождения 5 сентября 1862 г. (Repp. of the Brit. Assoc., 1862, p. 448) величину этого отступления Глешер считает доходящею при подъеме вначале, где были облака, до —15.°2 Ф. (на высоте 0′) и даже при границе облаков (7000′)= —8″1, а затем при чистом небе на высоте 18000′ Глешер ее принимает =+4.°0 Ф. При опускании на высоте 20000′ влияние распределения по расчету Глешера достигает до +9.°1 Ф. Следовательно ясно, что сам Глешер видит неравенства, которые в норме должно сгладить. Только он их ценит очень высоко,[1] руководясь предвзятыми представлениями, устранив которые, я достигаю того, что меру отступления от правильности редко ценю выше 2° Ф., да и то преимущественно тогда, когда есть облака или перемена ветра в направлении или силе. Поэтому отдельно взятым числам Глешера—нет права придавать никакого решающего влияния. А так поступает г. Рыкачев, считая, что 5 сентября 1862 г. „при давлениях“ ниже 13 дюймов температуры значительно ниже „тех, которые дает прямая линия“, проводимая мною, а поэтому будто бы наблюдения эти ясно „противоречат“ моему выводу. При устном изложении своих замечаний в заседании Физического общества г. Рыкачев особенно настаивал на том, чтобы я объяснил „причину того (Repp. of the Brit. Assoc., 1862, p. 422), как могла при давлении 10.″89 быть t=5.°0 Ф., ибо по принятой мною линейной формуле для этого рассчитывается t=0.°0 Ф.“ На это, по виду существенное, возражение замечу:

1) Что для 5 сентября 1862 г. Глешер для давлений ниже 13″ сделал всего 5 наблюдений, а именно (см. Repp. of the Brit. Assoc., 1862, p. 440) три несомненных:

	Подъем		Спуск
Время . . .	1 ч. 48 м.	1 ч. 50 м.	2 ч. 8.5 м.
Давление . . .	11.″95	11.″25	12.″55
Температура . . .	0.°0	—2.°0	+2.°0 Ф.

и два сомнительных, о которых я говорю далее.

[1] Это было выставлено мною в устном изложении 7 октября, и я заметил, что выгода моих приемов состоит именно в том, что мне не приходится принимать, как Глешеру, столь больших неправильностей наблюдения для таких восхождений, как 5 сентября 1862 г. Замечу здесь, что выведенные Глешером таблицы основаны на поправленных им числах.

2) Взяв среднее из двух наблюдений подъема и затем из этого числа и числа для спуска, получаем $t = +0.°5$ при $H = 12.''07$, или при $H = 12''$, $t = +0.°3$ (а не $+1.°9$, как нашел г. Рыкачев графически, см. табл. 1). При $12''$ по линейной формуле, высчитанной г. Рыкачевым для 5 сентября 1862 г., $t = +3.°9$, погрешность $= +3.°6$ Ф, по параболической формуле[1] г. Рыкачева (1) $t = +2.°7$, погрешность $= +2.°4$. Обе вычисленные температуры разнятся от наблюденной в одну и ту же сторону, обе выше, а потому, если г. Рыкачев находит, „что все причины должны повышать температуры", а ни одна не может понижать, то он должен был бы отказаться от своей параболической формулы и принять для выражения перемен температур кривую еще высшего порядка.

3) Наблюдение: $H = 10.''8$ и $t = -5.°0$ Ф. Глешера очень сомнительно,[2] даже, можно думать, что при $10.''8$ не была наблюдена t. На стр. 422 „Repp. of the Brit. Assoc." (1862) оно, правда, приведено, но тут можно предположить опечатку, ибо на стр. 440 и на стр. 448 температура $-5.°0$ Ф. ясно отнесена к давлению $H = 9.''753$, противу которого на стр. 422 оставлено в столбце температур белое место.[3]

4) Правда, что на стр. 384 упомянуто вышеприведенное наблюдение ($H = 10.''8$, $t = -5°$), но за то на следующей (385) странице есть число, показанное минимальным термометром в то время, когда Глешер впал затем в беспамятство, и которое по оценке Глешера и наблюдению его спутника Коксвеля отвечает приблизительно наименьшему достигнутому давлению $H = 7''$. Показание минимального термометра было $-12°$ Ф. По линейной формуле $t = -34.6 + 3.2077\,H$, которую г. Рыкачев так осуждает по отношению к низким давлениям, следует, что при $H = 7''$, температура будет $= -12.°2$ Ф. По той параболической формуле (1), которую г. Рыкачев считает лучше выражающею дан-

---

[1] Формулу эту должно читать: $t = -47.4 + 4.585\,H - 0.3442\,H^2$.

[2] Равно как и наблюдения в 2 ч. 7 м., когда на анероиде прочтено $H = 11.''53$, а на термометре $-2.°0$ (стр. 385, 422 и 440).

[3] В ответ на то, что г. Рыкачев не может „признать серьезным мое замечание [по ошибке стоит *возражение* — его делал не я, а г. Рыкачев — я отвечал на возражение], что Глешер мог дохнуть" и т. д., считаю необходимым ответить следующее: г. Рыкачев неверно передал мое замечание, оно было вызвано настоятельным вопросом г. Рыкачева: „какую же можно подыскать физическую причину того, что при $10.''80 - t = -5.°0$ вместо $0°$, как следует по линейной формуле"? Я ответил тогда приблизительно так: „если вам недостаточно ветра и других причин, могущих понижать температуру, то вы допустите, может быть, что Глешер, при том состоянии, в каком он был при столь низких давлениях, близко рассматривая термометр, дохнул на него, отчего влага осела на шарик термометра и отчет был сделан во время ее испарения, ибо времени наблюдения 1 ч. 50 м. (стр. 422) отмечает на влажном термометре понижение температуры как-раз на 5° Ф.". Предоставляю читателям сличить этот ответ со смыслом, который ему придал г. Рыкачев.

ные опыта для малых давлений, вычисляется для $H = 7''$ температура $t = -17.°0$. Не из этого однако я сужу о степени применимости линейной формулы к наблюдениям 5 сентября, потому что рассматриваемое наблюдение имеет слабую достоверность, как и при 10.″8 и 9.″75; за ними только вероятность, а нет достоверности.

5) Особенное же внимание должно обратить на то примечание, в котором сам Глешер как бы отвечает на вопрос о температуре —5° Ф., заданный мне г. Рыкачевым в декабрьском заседании Физического общества. Это примечание находится на упомянутой выше стр. 422 отчета Глешера и означено цифрою (8). Оно относится к 1 ч. 51 м., как и сомнительная температура —5° при $H = 10.''8$. Это примечание кратко, но ясно говорит о достоверности наблюдения: „Lost myself; could not see to read the instruments". Сознание у Глешера теряется, инструменты он не может читать, делает последние над собою усилия, пишет число в книгу, сам затем не разбирает: относится ли —5 Ф. к 10.″8, или к 9.″75, и затем кажется бы не должно было спрашивать физического объяснения такого наблюдения и даже нельзя много доверять соседним с ними. Это однако делает г. Рыкачев, желая указать в моей статье о температурах верхних слоев воздуха— несообразности разного рода.

Чем же определяется со стороны г. Рыкачева настойчивость такого желания? спросят, быть может, многие. По моему мнению, весьма почтенным побуждением — отстоять тот род разбора метеорологических данных, какого вместе с многими другими держится мой почтенный оппонент с давних пор. Он составил себе этим свое имя в науке. Школа метеорологов, к которой относятся многие славные имена и между прочим имя Глешера, может быть названа собирательною. Ей нужны одни числа и числа, она верит, что в будущем числа эти дадут науку, а что ныне за нее приниматься рано и что вся она состоит пока в нахождении поправок, в расчете разнообразных средних по часам и дням, по 5 дням, по месяцам и годам, по десятилетиям, по ясной и пасмурной погоде и т. д. Последними пределами обобщения служат при этом карты с линиями равных данных (изотермы, изобары и т. п.) и периодические формулы для периодов дня и года.

Выразителем этой школы метеорологов должно считать Шмида (E. E. Schmid) с его „Lehrbuch d. Meteorologie" (1860). Школа эта до крайности почтенна и достойна удивления по тому смирению, с которым она принимает факты, по той готовности, с которою она их отчасти обрабатывает, собирает необходимый строительный запас для возведения здания научной метеорологии. М. А. Рыкачев представитель этой школы в России. Некоторым ученым этой школы должны казаться чуть не посягательством— обобщения факта: они привыкли их собирать и много-много что

выводить из них среднее число; они желают находить опытные законы и пробуют даже иногда выводить теоретические обобщения, но видели не раз падение своих сооружений, сложенных из кирпича без цемента, и — изверились в возможность охватить целое.[1] На вопрос о температуре слоев воздуха ученые этой школы смотрят, как на вопрос важный, а главное, мало разработанный, а потому особенно интересный. Данные, полученные на горах и аэростатах, они обрабатывают путем, какой указали Гумбольдт для гор, Гей-Люссак для аэростатов. Моя, конечно, слабая и единичная, попытка уклониться от указанного пути, по преданиям школы, должна быть новаторством, а потому и неудачною. Зачинатели научной метеорологии много говорили о температуре небесного пространства—того, где нет воздуха, а то постоянное, которое входит в мои формулы, имеет это *физическое значение* (см. начало моего ответа), потому нельзя видеть в моем приеме чего-либо нового, это — старая, знакомая попытка определить эту температуру предельного слоя. Только этим способом могу я объяснить себе „Некоторые замечания"... г. Рыкачева. Он очевидно хотел показать, что дело, за которое я принялся, труднее, чем я думаю, что общий метеорологический вывод по отношению к температурам атмосферных слоев не по силам современникам, а главное, что мало данных, а потому согласился со мною, что желательно их собирать и в России. Радуюсь хоть этому согласию и благодарю при этом за добродушное отношение моего почтенного оппонента к моему предложению, для осуществления которого необходимо единение наших ученых сил. И я рад сойтись с г. Рыкачевым хоть на поприще собирания данных в высоких слоях атмосферы. Не мы с ним первые поняли необходимость и пользу такого изучения атмосферы. О нем раньше многих других думал Ломоносов. Эйлер и Лаплас в своих сочинениях показали ясно всю надобность — изучения верхних слоев атмосферы. Французские ученые первые взлетели высоко. Они продолжают начатое и ныне. За Шарлем, за Био и Гей-Люссаком — последовали многие. Истые путешественники — англичане затем стали выполнять давно задуманное систематически. И вот Вельч и Глешер крейсируют в воздушном океане.

Тогда стало видно, что другим необходимо последовать за ними, изучать климат разных слоев атмосферы и среди континентов. Россия с ее обширными пространствами суши для того пригоднее других стран. Проф. Ковальский на первом съезде русских естествоиспытателей высказал это с ясностью. Съезд

[1] Считаю уместным заявить, что школу времени Кемца и Гумбольта я отнюдь не смешиваю с тою, о которой говорю. Это были основатели научной метеорологии. Благодаря трудам школы чистых собирателей явились в лице Мори, Букана, Мона, Воейкова и др. продолжатели Соссюров и Гумбольдтов — строители новой метеорологии.

с радостью приветствовал предложение. Прошло восемь лет и ни средств, ни энергии, для выполнения необходимых, еще не нашлось. Будем надеяться, что теперь они найдутся, и хотя г. Рыкачев не соглашается с моими выводами, хотя я и доказываю, что его опровержения несостоятельны, мы сходимся в желании видеть осуществленными аэростатические подъемы в России. Это поучительно и ясно указывает на положение вопроса. В этом деле черед за русскими учеными.

Считаю излишним делать какой-либо общий вывод из всего сказанного выше, потому что „некоторые замечания" не заставили меня ни на сколько отступить от высказанного в октябрьском заседании Физического Общества.

1876. Рыкачев возражал еще раз, и я счел необходимым ему отвечать, хотя терпеть не могу полемики, но в нее меня часто втягивали. Для избежания этого я после стал действовать более обдуманно.

90. Еще несколько слов о температуре атмосферных слоев. „Журн[ал] Русс[кого] физ[ического] общ[ества]". Но кое-что мне в этой редакции не понравилось, и я ее немного изменил, как дано в № 91. 1876.

Журнал Русского Химического Общества и Физического Общества 1876 г., том VIII, часть физ., отд. I, вып. 2, стр. 95—100.

ЕЩЕ НЕСКОЛЬКО СЛОВ О ТЕМПЕРАТУРЕ АТМОСФЕРНЫХ СЛОЕВ

После моего октябрьского сообщения (см. протокол 1875 г.) о выводе, сделанном мною из аэростатических наблюдений Глешера над температурою воздушных слоев, М. А. Рыкачев высказал свои замечания; они напечатаны в первой книжке этого журнала за 1876 г. Там же и мой ответ. Теперь, в предшествующей статье этой книжки,[1] г. Рыкачев сделал свой вывод по предмету, мною рассматриваемому. Он разобрал 4 восхождения из 28 Глешера и считает все эти четыре относящимися к ясной погоде, а среднее изменение температур (для давлений от 27 до 19″) выражает уравнением

$$t = -57^\circ + 5.4492\,H - 0.061426\,H^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (A)$$

Такой вывод, не относящийся к действительности,[2] не заслуживает никакого доверия по следующим причинам:

1) Только два восхождения (5 сентября 1862 г. и 31 март 1863 г.), которые выбраны мною как примерные (см. протокол, октябрь 1875 г.), действительно равномерны и сделаны в сравнительно ясную погоду, но для них, как показал я в своих прошлых статьях, должно принять прямую линию за выражение

---

[1] В вып. 2 на стр. 89—91 напечатана статья М. Рыкачева „Еще несколько слов о выводах из наблюдений Глешера, произведенных им в разных слоях атмосферы". *(Прим. ред.)*

[2] Потому что неизвестно, какой начальной температуре t (при 27″) отвечает данная формула А. Если придать ей вид:

$$t = t_0 - 2.1321\,(27 - H) - 0.061426\,(27 - H)^2,$$

где t_0 есть температура при 27″, получим невозможный вывод, что при всякой начальной температуре данная разность давлений всегда произведет одно и то же изменение температуры, например при $H = 19''$ температура всегда будет на 21° ниже, чем при 27″. Опыт показывает, что чем выше начальная температура, тем быстрее изменения ее при подъеме вверх. Что же после этого выражает формула г. Рыкачева?

зависимости t от H, с чем соглашается и г. Рыкачев для давлений выше 13″ (см. вып. 1, стр. 12). Два других восхождения, служивших г. Рыкачеву для вывода (18 августа 1862 г., 12 января 1864 г.), относятся к числу таких, которые были сделаны преимущественно среди облаков. 18 августа 1862 г. облака, формами которых Глешер восхищался, были и при 26″ и при 17″ давления 12 января 1864 г. они начались от 27″ и простирались до 20″.; В этом последнем восхождении Глешер достиг 19″. Наверху он встретил кроме того снег. Сам он этого восхождения не вводит в свои расчеты.[1]

Г. Рыкачев нашел для каждого восхождения, путем графического построения, средние температуры для тех мест, где

давление равно	27″	25″	23″	21″	19″,	а именно
18 августа 1862 г. . . .	54.°4	51.°5	51.°0	46.°2	39.°7	Фаренгейта
5 сентября 1862 г. . . .	51.°4	45.°7	40.°0	33.°0	27.°0	„
31 марта 1863 г. . . .	34.°3	31.°0	27.°5	22.°7	16.°9	„
12 января 1864 г. . . .	40.°7	33.°3	27.°6	19.°2	11.°7	„
Приняты г. Рыкачевым температуры	45.°2	40.°6	36.°5	30.°2	23.°9	

По этим средним г. Рыкачев и вывел формулу (A).

Вот как изменяются температуры в двух облачных восхождениях (18 августа и 12 января) при перемене давления на 1.″

	27″ — 25″	25″ — 23″	23″ — 21″	21″ — 19″
18 августа 1862 г. . .	0.°8	0.°8	2.°7	3.°3
12 января 1864 г. . . .	3.°7	2.°9	4.°2	3.°8

В первом восхождении разность сперва очень мала, потом быстро возрастает, во втором правильности вовсе нет. Для 18 августа при переходе от 27″ к 23″ перемена температур равна всего 3.°4, а для 12 января 13.°1. Притом 18 августа начальная температура гораздо выше, чем 12 января. Это одно указывает отсутствие нормальных условий. Что же выражает среднее из кривых и прямых линий? Средний вывод тогда хорош, когда он, включая в себе все входящие величины, дает понятие о каждой из них и только устраняет погрешности опыта. А такое среднее, какое берет г. Рыкачев, ровно ничего не выражает.

2) В первой своей статье (вып. 1, стр. 11) г. Рыкачев определяет, что температура крайнего слоя атмосферы, где $H=0$, должна быть *ниже* —76°Ф. На основании этого он и отвергает

[1] Цитаты на все это приведены в моей статье, помещенной в прошлой книжке.

мои выводы, дающие $C = -36^{\circ}$ (см. вып. 1, стр. 26). Ныне он дает такую формулу, по которой следует, что при $H=0$ температура будет $= -57°$Ф. Так как она выше $-76°$Ф., то г. Рыкачев сам себе явно противоречит.

3) Взяв значение t по А, находим, что вычисленная для 23″ температура (35.°8) разнится от наблюденной средней (36.°5) на 0.°7, для 22″ разность $= 33.1 - 34.4$ даже $= 1.°3$; следовательно г. Рыкачев должен считать возможную погрешность среднего результата по крайней мере около $\pm 2°$ Ф. Если же допустить такую возможную погрешность, то должно допустить и для среднего вывода г. Рыкачева прямую линию, потому что отступления от нее только в одном месте (при 22″) достигают 1.°7. Но прямую или какую-либо кривую не должно применять к расчету средних г. Рыкачева, потому что они не отвечают никакому действительному распределению температур по воздушным слоям.

4) Устраняя данные 18 августа, в которых нет никакой общей правильности, получаем по числам г. Рыкачева средний вывод для каждого дюйма (от 27 до 19″), дающий для 3 восхождений вероятнейшую прямую:

$$t = -36.°1 + 2.908\,H \quad \ldots\ldots\ldots \quad (B)$$

с квадратическою погрешностью $\pm 0.°5$, с вероятною среднею погрешностью каждого данного $\pm 0.°3$, т. е. показывающий, как я и утверждаю (см. протокол 7 октября 1875 г.), что лучшие наблюдения Глешера дают всегда для C величину близкую к $-36.°5$ Ф.

	27″	26″	25″	24″	23″	22″	21″	20″	19″
Данные температуры .	42.1	39.1	36.7	33.5	31.7	28.6	25.0	21.7	18.6 Ф
Вычисленные по (В) . .	42.4	39.5	36.6	33.7	30.8	27.9	25.0	22.1	19.1 Ф
Разность	−0.3	−0.4	+0.1	0.2	+0.9	+0.7	0.0	−0.4	−0.5 Ф

5) Взяв из 4 восхождений только два (5 сентября и 31 марта), при которых очевидна равномерность и была ясная погода, получаем прямую с большою точностью. Следовательно некоторое искривление зависит от ввода двух других наблюдений, сделанных при облачной погоде. Это уясняется при нанесении всех четырех восхождений на чертеже: восхождения 18 августа и 12 января выражаются кривыми, так изогнутыми, что ветвь, направленная к $H=0$, пересекает ось давлений ниже $-40°$. Это зависит от того, что в деле распределения температур в слоях воздуха облака играют действительную и очень видную роль. Развитию этого положения я посвящаю особую главу в моей статье о температурах воздушных слоев. Облака суть действительные экраны. Начиная от них, идя вверх, распределение тепла такое же, как и начиная от земли. Если над облачным слоем

чисто и светит солнце, то получается прямая, показывающая, что на земле была бы высшая температура, чем в действительности наблюденная. В слое над облаком тогда температура выше, чем была бы она, если бы облака не было, а температура зависела только от слоя, близкого к земле. Оттого над облаком часто температура выше, чем под облаком. В среде облаков, очевидно, будут случаи различные, и прибыль и убыль противу нормы. Это понятно само по себе и яснейшим образом вытекает, как из данных Глешера, так и из метеорологических наблюдений вообще. Если под облаками чисто, то ход температуры, как и над облаками, выражается хорошо прямою линиею. Обе прямые (полученные над и под облаком) сходятся при $H=0$ в одну точку (конечно с погрешностью, зависящею от многих причин). Эти положения твердо опираются на данные Глешера. Теперь представьте себе, что часть данных взята над облаком, другая среди облаков, третья под облаком.[1] Если все данные стараться выразить одною линиею — это будет кривая, а в сущности это две прямых. Общая кривая для облачной погоды, может показаться изогнутою так, как[2] изогнута кривая 18 августа в выводе г. Рыкачева, но она может представиться с выпуклостью и в другую сторону и тогда она дает при $H=0$ температуру высшую, чем та, которую дает действительная прямая. То же будет и тогда, когда вверху будет дуть теплый ветер, что часто замечал Глешер. Таковы, например, данные 26 июня 1863 г.[3] В этом то и дело, что некоторые из наблюдений Глешера дают кривые, загнутые в одну, другие в другую сторону. Изгибы не велики, и если бы г. Рыкачев действительно потрудился расчесть побольше наблюдений Глешера — он бы увидел, что стройность представляют только те наблюдения, которые близки к прямой, что она же получается, взяв действительное среднее из всех сколько-либо стройных наблюдений, конечно обращая притом внимание на частные обстоятельства (облака, ветер и т. п.) каждого восхождения, а то он взял два действительно лучших наблюдения (и высоких

---

[1] В подлиннике очевидная опечатка „над". *(Прим. ред.)*

[2] В подлиннике: „изогнутою, так как". *(Прим. ред.)*

[3] В этом отношении особенно поучительно восхождение 29 августа 1864 г., ибо оно сделано в совершенно ясную погоду. Регулированные данные его суть: $30'' = 71.°5$; $27.''5 = 61.8$; $25'' = 52.°0$; $22.''5 = 43.°5$; $20'' = 35.°5$, среднее время 4 ч. 49 м. Вероятнейшая прямая: $t = -39.2 + 3612\,H \pm 0.°4$, наибольшее уклонение 0.°9 Ф. Если принять во внимание некоторое искривление прямой, то получается парабола вида:

$$t = -4.°9 + 0.934\,H + 0.05376\,H^2.$$

Она очень точно выражает данные. Средняя вероятная погрешность $\pm 0.°1$, наибольшее отступление от нее 0.°2 Ф., а она дает для постоянного совершенно недопустимую величину — 4.°9 Ф. Этот пример чрезвычайно поучителен для убеждения в том, что параболу брать вообще не должно.

и при сравнительно ясной погоде, выставленных мною как примерные) Глешера, да потом примешал к ним данные двух восхождений, хоть и высоких, но сделанных в облачную погоду. Оттого и получены им числа, которые точнее всего выражаются ломаною линиею. Оттого его средние стройности не имеют. Одному дюйму отвечают у него понижения температуры: 2.5, 2.1, 2.5, 1.6, 2.1, 4.2, 3.4, 2.°9.

Этою своею заметкою я желал бы: 1) с своей стороны временно прекратить прение с г. Рыкачевым, потому что теперь, пока, занят другими работами, а полную статью о температуре воздушных слоев предполагаю кончить не ранее весны; 2) сделать заявление о влиянии облаков, замеченном мною в данных Глешера и др. аэронавтов. Влияние это, подвергнутое мною в последнее время расчету, заставляет меня обратиться к новой переработке всех мною собранных материалов. Связь между изменением влажности и температуры в некоторых восхождениях также выступает с ясностью. Так как эта связь отвечает моим теоретическим соображениям, высказанным в ноябрьском и декабрьском заседаниях Физического Общества, то я и этот предмет постараюсь изложить в своей подробной статье, что и спешу теперь заявить, чтобы сохранить за собой право разработки предмета, общие начала которого мною уже вкратце высказаны.[1] Спешить изложением я не желаю, но не хочу также

---

[1] В подробной статье я предполагаю говорить также и о температуре предельного слоя атмосферы, о чем до сих пор не вел речи (см. статью предшествующей книжки журнала).

Прим. ред. В вып. 4 на стр. 195—206 напечатана статья „Возражение М. Рыкачева на ответ Д. И. Менделеева по вопросу о температуре верхних слоев атмосферы", которую редакция журнала сопроводила следующим примечанием:

„То сообщение Д. И. Менделеева о температуре атмосферных слоев, которое дало повод для статей М. А. Рыкачева, помещено до сих пор только в протоколе заседания Физического Общества 7 октября 1875 г. (см. „Ж. Р. Х. Ф. О.", 1875, вып. 8, стр. 260) в виде краткого реферата [15—20]. * Подробную статью автор предлагает (см. „Ж. Р. Х. Ф. О." 1876, стр. 28 и 99) напечатать после лета. В декабре 1875 г. М. А. Рыкачев сделал в Физическом Обществе свои замечания на сообщение Д. И. Менделеева. Они напечатаны в 1-м выпуске журнала за 1876 г., стр. 10. Там же (стр. 19) и ответ Д. И. Менделеева [241—269]. Затем, во 2-м выпуске журнала (стр. 89) М. А. Рыкачев и Д. И. Менделеев (стр. 95) [273—278] вновь, в кратких статьях, рассматривают вопрос о наблюдениях Глешера над температурою воздушных слоев. Д. И. Менделеев просит теперь редакцию журнала сообщить о том: 1) что он, по причине других занятий, согласно сделанному заявлению (см. 1-ю книжку журнала, стр. 28 и книжку 2-ю, стр. 99) отлагает на некоторое время дальнейшее прение с М. А. Рыкачевым, тем более, что свою подробную статью он предполагает писать летом; 2) что он, кроме указанных статей, сообщил свои исследования по теории вопроса о температуре атмосферных слоев в Физическом Обществе

* Цифры в прямых скобках означают страницы настоящего тома. *(Прим. ред.)*

и утратить обычное право научного первенства в дальнейшей разработке вопроса (о температурах воздушных слоев) с тех точек зрения, которые мною уже высказаны.

Пользуясь случаем, спешу заявить, что профессор астрономии в казанском университете г. Ковальский в письме ко мне сообщает, что Томсон, ранее меня, принял во внимание влияние осаждения влажности на ход изменения температур в воздушных слоях. Мемуар его я не мог еще достать и, если мои выводы согласуются с выводами известного английского физика, то я конечно утрачу долю права первенства, но зато буду вознагражден тем, что проводимые мною воззрения найдут опору в авторитете Томсона. Считаю также долгом прибавить, что проф. Ковальский, с своей стороны, предпочитает не вводить в расчет осаждения влажности, причем руководствуется тем, что в действительности верхние слои атмосферы не всегда содержат облака. Предмета этого я уже коснулся в устном моем сообщении Физическому Обществу и рассмотрю его в готовящейся статье. Кстати полезно заметить здесь, что восхождения Вельча и Глешера, сделанные в туманной Англии, тем много страдают, что почти все сопровождались туманами или облаками. Одно восхождение 29 августа 1864 г. совершено было при почти совершенно чистом небе. Близость моря, значительность содержания влаги и облака в английских полетах делают их своеобразными. Тем желательнее полеты в России, где легко выбрать совершенно ясную погоду, очень сухое время и безопасно совершать восхождения ночью. У нас, в этих условиях, а особенно при действительно высоких восхождениях, быть может, получим иной ход в изменении температур, чем тот, который можно вывести из данных Глешера. Невольно приходится кончать тем же, чем и прежние заметки — черед за русскими учеными. Интерес к делу имеется, потребность очевидна, силы найдутся — необходимы средства. Неужели они не найдутся?

(см. протокол заседания 1875 г., ноябрь вып. 9, стр. 327) [23—27] и в Парижской академии (см. „Comptes Rendus", 81, вып. 23 и 24) [23—28] и, сверх того, по тому же предмету помещена в 1876 г. его статья в „Bibliothèque universelle de Gènève" [35—49] и 3) что он просит читателей сличить ныне прилагаемую статью М. А. Рыкачева с двумя указанными его прежними статьями и со статьями Д. И. Менделеева для того, чтобы уяснить сущность и причины разноречий. Редакция".

Журнал Русского Физико-Химического Общества 1879 г., т. XI, часть физ. отд. 1, вып. 7, стр. 108—109.

ВЫПИСКА

из протокола 15-го заседания Физического отделения

11 сентября 1879 г.

2. Д. И. Менделеев сообщает о втором международном метеорологическом конгрессе, бывшем в апреле этого года в Риме. Научные результаты этого съезда вообще менее значительны, чем первого съезда.

Особенно выдавались по новизне предмета сообщения Ценгера (из Праги) о фотографических изображениях солнца как предвестниках погоды и итальянского ученого де-Росси—о соотношении между сисмографическими наблюдениями мелких колебаний почвы и атмосферными изменениями.

1877. Тут результат моих статей об этом интереснейшем предмете и часть опытов с М. Л. Гросман. Думаю, что тут много самостоятельного и важного.

146. О сопротивлении жидкостей. Сообщ[ение] в общем собр[ании] [Русского] физ[ико]-хим[ического] общества 27 декабря 1879 г.

Журнал Русского Физико-Химического Общества 1880 г., отд. I, т. XII, вып. 1 и 2 стр. XV—XX.

ВЫПИСКА

из протокола общего собрания Физ.-Хим. Общества

27 декабря 1879 г.

Д. И. Менделеев сообщал о сопротивлении жидкостей как о предмете, мало разработанном с опытной стороны, а заслуживающем большого внимания по его историческому, теоретическому и практическому значению. Инерционная теория сопротивления, данная Ньютоном, и разные ее видоизменения оказались несогласными с действительностью. Когда они придумывались не было, да и теперь нет, запаса прочных опытных и численных выводов, которые можно было бы положить в основу рассуждения для построения исходной гипотезы. Инерция жидкостей как причина сопротивления оказывается недостаточною уже по одному тому, что существует трение о поверхности, параллельные с направлением пути. Трение капельных и газообразных жидкостей, изучавшееся со времени Дю-Бюа в течении рек, в движении воды по трубам, определяемое прямее в опытах Бофуа и Фроуда над движением доски в воде, измеряемое в опытах Кулона, Максуэля, Мейера и др., над колебанием круговых пластинок, в исследованиях над качанием маятника, а также в исследовании течения по волосным трубкам, оказывается играющим большую роль во всех вопросах гидродинамики, а потому должно занять, если не преобладающую, то во всяком случае большую роль в учении о сопротивлении, потому что трения никак нельзя избежать. Трение жидкостей не зависит от давления, под которым происходит, пропорционально поверхности, не зависит от ее свойств и возрастает со скоростью, как видно из всей совокупности опытов, а потому законы его глубоко отличаются от законов трения твердых тел. Прямые опыты Бофуа и Фроуда показывают, что трение воды на 1 кв. метр гладкой плоскости, движущейся со скоростью 1 метра в секунду в направлении одной из линий, на плоскости лежащих, близко к 0.15 кг и затем растет пропорционально менее чем 2-й степени скорости. Негладкие поверхности, например дно реки или стенки водопроводных

труб, дают гораздо большее трение, но здесь уже участвует сопротивление выдающихся частей, как в поезде вагонов, исследованном Памбуром, сопротивляется не один передний, а отчасти и задние вагоны. В тонких трубках и при качаниях дисков трение оказывается пропорциональным 1-й степени скорости, как видно из закона Пуазелля, из опытов Кулона и др. Надо думать, что с возрастанием скорости зависимость трения от скорости изменяется. Кроме того, при малых радиусах кривизны, коэффициент пропорциональности зависит от радиуса. Поэтому оказывается необходимым слить учение о сопротивлении движущегося тела не только с учением о давлении движущейся жидкости на тела, препятствующие движению, но и с учением о трении, что и сделали Сен-Венан, Ранкин и др., объясняющие во многих случаях все сопротивление одним трением. Практическое применение фрикционной теории сопротивления к кораблестроению, данное Ранкином, однако не может быть допущено в науке о сопротивлении до тех пор, пока не будет известна мера силы трения на плоскости и поверхности, наклонных к направлению пути, потому что нормальная тонкая пластинка, поверхностью в 1 кв. метр, при скорости 1 м в секунду, представляет в воде сопротивление около 66 кг, т. е. в 220 раз большее, чем та же пластинка, движущаяся параллельно с направлением пути, а при уклоне под разными углами сопротивление растет почти пропорционально мере угла уклона и почти так же возрастает оно для призм, кончающихся пирамидами. Притом оказывается из опытов, что трение при медленном движении пропорционально 1-й степени скорости, а сопротивление, сколько известно до сих пор, оказывается и тогда пропорционально 2-й степени. Сверх того средний вывод из опытов над сопротивлением шаров, движущихся в воде и в воздухе, показывает пропорциональность сопротивления плотности жидкости, как требует инерционная гипотеза, трение же воды и воздуха при малых и больших скоростях не пропорционально их относительным плотностям.

Недостатки теории сопротивления и важное значение учения о нем для таких областей практики, как кораблестроение, устройство гребного винта, воздухоплавание и т. п., равно как и теоретическая связь со многими вопросами механики, физики и химии, даже физиологии (движение соков в сосудах) заставляют желать накопления измерений и усовершенствования опытных исследований, сюда относящихся, потому что и в этом отношении учение о сопротивлении обставлено весьма слабо, а без них нельзя ждать усовершенствований в этой области гидродинамики. Одни из приемов измерения и опыта недоступны для кабинетных работ (сопротивление артиллерийских снарядов в воздухе и больших моделей в воде) и требуют сложных и дорогих приспособлений. Но есть другие приемы, при помощи которых све-

дения о сопротивлении воздуха, воды и других жидкостей могут быть доступны многим исследователям. Сюда относятся: 1) способ наблюдения качаний (Ньютон, Дю-Бюа, Плато, Кулон и др.), но здесь скорости малы и переменчивы; 2) определение напора жидкости при помощи разных видоизменений трубки Пито (Дю-Бюа, Ромм, Лагергельм, Дюшемен, Дюпре и др.); 3) падение тел в жидкой среде (Ньютон, Бенцберг, Морен, Шик, Цушлаг и др.); 4) движение маховика грузом (Робинс, Борда, Хуттон, Ваинс, Тибо, Гаген и др.); 5) определение реакционной работы, действующей в приборах, подобных ветряным мельницам (Смитон, Бофуа, Рыкачев); 6) давление ветра и потоков (Мариотт, Руз, Тибо, Венгам и др.). К этим, применявшимся уже многократно приемам должно прибавить непосредственные весовые (или динамометрические) определения, которые в большом виде дали уже отличные результаты, почти свободные от поправок на трение и другие побочные влияния. Особенно удобным представляется этот прием для решения некоторых задач сопротивления, еще не разрешенных опытным путем или сомнительных, например различие меры сопротивления при движении тела от меры давления при движении среды, отношение параллельной с движением слагающей к той перпендикулярной слагающей (реакции), которая действует в крыле птицы при ее поступательном движении, в крыльях ветряной мельницы, в пароходном винте и т. п. Тот же прямой весовой способ пригоден для изучения в большом виде сопротивления тел при движении их в воде и в воздухе; например, если на носу парохода укрепить вертикальное коромысло, к нижнему подводному концу прикрепить тело, а на верхнем уравновешивать давление, получающееся на тело при движении парохода. Примененный к вращающемуся маховику простой динамометрический прием даст уже точные числа, свободные от всегда сомнительных поправок на трение.

Всего же доступнее измерению и вообще изучению явления при падении тел. Опыты этого рода, начатые г-жею М. Л. Гросман и Д. И. Менделеевым, направлены главным образом к тому, чтобы получить сведения о влиянии свойств жидкости на оказываемое ею сопротивление. Для этой цели в 90% спирте было растворено столько хлористого магния, чтобы получить жидкость такой же плотности, как вода, и измерялись времена падения разных тел в воде и в спиртовом растворе. Оказалось, что при разной плотности все тела падали в спирте медленнее, чем в воде. Так, медный шар диаметром в 40.1 мм проходит 41 см в 13.0 сек. в воде и в 14.2 сек. в спирте, если вес его в жидкости был 0.0505 г, а вес в воздухе — 33.95 г. Тот же шар и в том же сосуде, имеющем диаметр 200 мм, в воде падал в 6.4 сек., а в спиртовой жидкости в 7.1 сек., когда вес его в жидкости был 0.2311 г, а в воздухе — 34.14 г и т. д. Оказалось

вообще, что сопротивление этого шара в воде на каждый кв. метр сечения близко к 32 кг, а в спиртовой жидкости около 42-х при скорости 1-го метра, считая сопротивление пропорциональным квадрату скорости. Малые стеклянные шары, конусы и цилиндры, при малом движущем весе, равно как и обыкновенный бисер, исследованные до сих пор, все падают в спиртовой жидкости всегда тише, часто почти вдвое медленнее, чем в воде при одинаковой плотности. Это дает сопротивление при малых скоростях для спиртовой жидкости гораздо большее, чем для воды. При увеличении движущего веса, а потому и скорости падения, времена падения приравниваются. Так как определения были сделаны со спиртовыми растворами большей (1.0015) и меньшей (0.9987) плотности, чем вода, и в обеих жидкостях замедление было ясно, то несомненно, что оно определяется основным различием воды и спиртового раствора хлористого магния. Известно, что спирт вытекает из тонких трубок медленнее, чем вода, т. е. представляет большее внутреннее трение или вязкость, чем вода, а потому весьма вероятно, что различие времен падения зависит от различия трения. Во всяком случае несомненно, что когда движение медленно, одной инерцией жидкости сопротивление не объясняется. Особенно ясно это при сличении времен падения в воде и нефтяном масле, которое гораздо легче воды. Если бы действовала одна инерция, падение в нефти было бы всегда скорее, чем в воде, потому что в нефти движущий вес данного тела больше, чем в воде. А между тем многие тела малого диаметра или тела большей поверхности (цилиндры) падают в нефтяном масле гораздо медленнее, чем в воде. Так, бисер, падающий в воде (высота 41 см) в 3 сек., проходит в нефтяном масле тот же путь во время около 10 сек. Замечательно, что шары диаметром более 8 мм, даже при малом движущем весе, падают однако скорее в нефти, чем в воде. Но и одно трение недостаточно для объяснения всего сопротивления, потому что при возрастании скорости, сопротивления и времена падения сравниваются для воды и спиртового раствора. Подобные же измерения показали, что сопротивление сильно растет от близости стенок. Так шар, имеющий 40.4 мм в диаметре, проходит 41 см в воде в 8 сек., когда сосуд был диаметром в 200 мм, при диаметре же сосуда 53 мм — в 20.4 сек. Непосредственные наблюдения над легкими телами, могущими легко двигаться в жидкости, показали, что движение жидкости при проходе падающего шара заметно еще на расстоянии, в 4 в 5 и даже 6 раз превышающем радиус падающего шара. Это заставляет брать для точных измерений сосуды больших размеров и показывает неверность того предположения о передаче давления по круговым сифонам, которое лежит в основании теоретических представлений Бурачка о сопротивлении корабля.

Вообще недостаток опытных исследований явлений сопротивления составляет, по мнению Менделеева, причину недостатка теоретических сведений об этом предмете (поэтому он не излагается в обычных курсах механики и физики, даже в обширных), а этот недостаток препятствует успехам мореплавания и воздухоплавания, которые, равно как многие теоретические области, выиграют от решения задач сопротивления. Поэтому М. обращает внимание физиков и химиков на опыты и измерения, касающиеся сопротивления, так как многие из них легко доступны каждому.

Д. И. Менделеев
1880 г.

1880. В 1878 заболел плевритом, уехал по совету С. П. Боткина на зиму в Ниццу, а там занялся воздухоплаванием и сопротивлением среды. Книга вышла полна разного интереса (тогда я уже любил Анну Ивановну), на ее окончание личных средств не стало (они пошли на дела семейные), а казенных не дали, оттого и не продолжал.

147. О сопротивлении жидкостей и о воздухоплавании. Выпуск 1. 1880.

О СОПРОТИВЛЕНИИ ЖИДКОСТЕЙ

И

О ВОЗДУХОПЛАВАНИИ

Д. МЕНДЕЛЕЕВА

ПЕРВЫЙ ВЫПУСК

(С 12-ю таблицами чертежей)

С.-ПЕТЕРБУРГ
Тип В. Демакова, Новый пер., д. № 7
1880

К ЧИТАТЕЛЮ

„Для чистых целей нужны и чистые средства".

„Вино новое не вливается в мехи старые".

Исследования, произведенные мною в 70-х годах над законами, управляющими разреженными газами, заставили меня интересоваться верхними слоями атмосферы, где воздух естественным образом находится в том состоянии малой плотности, которое определяется малым давлением. Этот интерес привел меня в область метеорологии верхних слоев воздуха. А отсюда прямой переход к изучению воздухоплавания, дающего единственную возможность познать эти неизведанные края океана, омывающего сушу и воду. Мною овладело желание проверить на особо приспособленном аэростате тот закон перемены температуры с давлением разных слоев атмосферы, который я вывел (Ж.Р.Ф.Х.О., 1875, и отчеты Парижской Академии, 1876)[1] из совокупности имеющихся до сих пор наблюдений, произведенных при высоких аэростатических поднятиях, начатых в России Захаровым и выполненных потом французами и англичанами, соперничавшими друг перед другом в опытном изучении верхних слоев атмосферы. И мне за облаками хотелось померяться с ними сноровкой и догадкой. Выполнение этого желания, — в приличных делу размерах, необходимых для дальнейшего успеха изучения, требовало однако столь больших средств, что я ими не мог располагать. Чтобы их приобресть, я издал две книги: перевод отличного сочинения Мона „Метеорология" — не было еще нигде, ни одной, столь полной и современной книги — и „Материалы для суждения о спиритизме", которым тогда много занимались. Конечно, я рассчитывал на спрос этих и еще двух, прибавленных, более специальных — моих сочинений („Об упругости газов" и „О барометрическом нивелировании и высотомере") и назначил могущую оказаться выручку (от 1876 до 1880 г.) на первые расходы для осуществления моего желания. Те книги не пошли, до сих пор еще не окупились, лежат у меня. Но эта неудача не охладила моего интереса к воздухоплаванию, которое теперь привлекло меня само по себе, когда я ближе стал с ним знакомиться. В то время

---

[1] См. стр. 15—32 настоящего тома. *(Прим. ред.)*

(1878 г.) другие занятия и надобность поправить здоровье заставили меня провести зиму в теплом климате, на юге Европы. При этой поездке я получил от морского и военного министерств поручение собрать сведения о современном состоянии воздухоплавания. Во время восточной войны было предложено так много проектов применения воздухоплавания к военным целям, что стало необходимым ориентироваться в этом вопросе, постановка которого сложна и еще далеко не ясна. Особый интерес представляют при этом попытки произвольного перемещения в воздухе в желаемом направлении, т. е. управление полетом.

Из того, что птица летит куда хочет, всегда выводилось, что механически овладеть воздухом возможно при помощи тяжелейших, чем воздух, тел, таких, как крылья, перья, мускулы и кости птицы. А из того, что рыба, плотность тела которой мало отличается от плотности воды, свободно в ней плывет по желаемому направлению, даже против быстрины порогов, кажется несомненным, что аэростатом, плотность тела которого близка к плотности воздуха, можно механически управлять для борьбы против ветра. Последний способ представляется наиболее надежным и легче осуществимым уже потому, что под водой плавают столь большие животные, как киты, тогда как в воздухе движутся лишь насекомые и птицы ограниченных размеров. Притом первые попытки управляемых аэростатов, сделанные во Франции Жиффаром и Дюпюи-де-Ломом, были не безуспешны. Наконец, надо же понять, что, устраивая первое колесо и доходя с ним до локомотива, человек сочинил род движения не как простой рабский подражатель природных форм, а как разумный творец, пользующийся в природе материалами и силами для своих собственных, общественностью созданных целей, не имевшихся в виду у природы. По этому всему — аэростат надежнее, ближе к цели, чем птицеподобные летательные машины. Изучение истории всего дела воздухоплавания, знакомство с французами, им занятыми, и личные мои опыты в малом виде и соображения убедили меня, с одной стороны, в возможности будущего успеха, а с другой, — в необходимости для овладения воздушным океаном, — хотя бы то для целей столь исключительных, как военные, почтовые, научные и т. п., где свобода и скорость сообщения стоят на первом плане, а ценность на десятом, — еще многих и многих предварительных исследований и попыток, преимущественно при помощи аэростатов. Россия приличнее для этого всех других стран. У других много берегов водяного океана. У России их мало сравнительно с ее пространством, но зато она владеет обширнейшим против всех других образованных стран берегом еще свободного воздушного океана. Русским поэтому и сподручнее овладеть сим последним, тем больше, что это бескровное завоевание едва ли принесет прямые личные выгоды, —

товаров должно быть никогда не будет выгодно пересылать по воздуху, — а между тем оно, вместе с устройством доступного для всех и уютного двигательного снаряда, составит эпоху, с которой начнется новейшая история образованности.

Но как, идя на войну, надо предварительно узнать и приготовить многое, чтобы успех был возможен, потому что одного порыва, доброй воли и храбрости для успеха мало, хотя без них вся внешняя подготовка может быть напрасною, так и в каждом научном завоевании: успех возможен только при надлежащей подготовке, соединенной с твердою уверенностью в необходимости, пользе и благе от предпринимаемой борьбы с природными силами — слабыми внешними средствами, сильными лишь этой уверенностью. Главную подготовку для овладения воздушным океаном, первое орудие борьбы, — составляет знание сопротивления среды, или изучение той силы, против которой придется бороться, побеждая ее соответственными средствами, в том же сопротивлении жидкостей берущими свое начало. Вот почему, вникнув в существо задач воздухоплавания, я обратился прежде всего к вопросам сопротивления среды и им посвящаю большую часть предпринятого труда. Те исторические и те физико-механические интересы, которыми завлек меня вопрос о сопротивлении среды, а также тот недостаток, который чувствуется в совокупности современных сведений об этом предмете, вместе с моим личными попытками восполнить некоторые из существующих пробелов и с тем значением, которое имеют вопросы сопротивления для мореплавания, — заставили меня посвятить этому предмету больше, чем я думал первоначально, времени и места в этом сочинении, посвященном воздухоплаванию.

Издание этого выпуска было возможно, благодаря содействию морского министерства. Для ясности изложения я снабдил этот выпуск чертежами, взятыми из подлинников и касающимися исследований сопротивления воды и воздуха и, если буду иметь возможность, для той же цели снабжу один из предполагаемых дальнейших выпусков чертежами, касающимися воздухоплавания. Занятый по обязанности и привычке, а отчасти по необходимости и по свойству характера, многими разнообразными делами, которые однако стремлюсь доводить до конца, я не могу дать обещания относительно времени выхода следующих выпусков этого труда; могу сказать только, что все необходимое для окончания этого труда имеется уже в моем распоряжении. Время же для изложения и средства для издания, надеюсь, найдутся, если увижу, что в таком, как мой, научном труде — есть действительная надобность и какая-нибудь польза для занимающего меня дела и для тех, кому труд этот назначается.

Д. Менделеев

Апрель, 1880.

СОПРОТИВЛЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ [1]

Тело, перемещающееся в какой-либо однородной среде,[2] необходимо должно сообщать ее частицам долю своего движения, на что неизбежно требуется затрата некоторого количества работы. По этой причине всякое движение, возбуждаемое ли постоянно действующими силами, напр. падение тел от тяжести, движение судна под влиянием винта и т. п., или продолжающееся по инерции (от ранее подействовавшей силы), напр. движение пули или ядра, стрелы и т. п., — замедляется каждый раз, когда совершается в некоторой среде, что и составляет так называемое *сопротивление среды* или сопротивление жидкостей.

Сопротивление среды должно быть рассматриваемо как сила, потому что сила есть все то, что производит, изменяет, ускоряет или замедляет движение, а сопротивление среды имеет именно такое значение: сопротивление среды препятствует, замедляет движение лодки. Но оно же и служит для движения при упоре в воду веслом или винтом, или каким-либо другим способом. Как сила — *сопротивление среды измеряется фунтами, килограммами* или тому подобными единицами веса.[3] *Работа сопротивления*, как и работа всякой силы и всякого двигателя, выражается произведением из пройденного пути на меру силы сопротивления. Если, например, сопротивление какого-либо шара в воз-

---

[1] Учение о сопротивлении твердых тел составляет весьма обработанную часть механики и не входит вовсе в предмет, рассматриваемый в этой статье. А потому под словами „жидкость" или „среда" здесь должно подразумевать исключительно капельные и газообразные жидкости.

[2] При переходе из одной среды в другую явления усложняются, но в сущности не изменяются. Движение в воздухе, который имеет различную плотность в разных своих слоях, может быть рассматриваемо как движение в среде однородной только до тех пор, пока перемены высот двигающихся тел сравнительно не велики.

[3] Собственно, грузы, измеряющие вес, или гири суть массы, а не силы. Но заменяя обычные весы — пружинными, которые измеряют уже силы, а не массы, легко видеть то простое отношение, которое существует между весом и силой. Абсолютною мерою сил должна служить, по предложению Гауса, такая сила, которая способна сообщить единице масс (напр. 1 килограмму) в единицу времени (в 1 секунду) скорость, равную единице длины (1 метр).

духе равно R кг, а пройденный им путь h, то вся работа сопротивления $=hR$ килограммометров. Если этот путь пройден с равномерною скоростью в n секунд, то в одну секунду проходится путь $\frac{h}{n}=v$, и следовательно в 1 секунду на сопротивление требуется работа Rv килограммометров или $\frac{Rv}{75}$ лошадиных сил.

Очевидно, что при решении задач воздухоплавания необходимо иметь полное знакомство с вопросом о сопротивлении воздуха, если желательно по произволу направлять движение тел в воздухе. Сопротивление воздуха, в этом смысле, составляет причину той затраты работы, которая необходима для управления двигающимся в воздухе прибором, и единственное средство для произведения желаемого, самостоятельного перемещения.

Для того, чтобы давать направление двигающемуся телу в воздухе, необходимо опираться опять-таки на тот же самый воздух, пользуясь силою сопротивления воздуха, потому что в воздушной среде не встречается никакой другой точки опоры. Когда на поверхности воды находится (плавает) некоторое тело, то можно производить движение или при помощи сопротивления воды, или при помощи сопротивления воздуха, или даже пользуясь сопротивлением твердых тел — берегов или дна, каната или цепи. В первом случае, т. е. пользуясь сопротивлением самой воды, применяют весла, винт и колеса, во втором случае (пользуясь сопротивлением воздуха) применяется парус; но можно также перемещать плавающее в воде тело, заставляя двигаться в воздухе винт, подобный обыкновенному пароходному винту или крыльям ветряной мельницы. На воде можно двигаться также, упираясь и в сушу, как это бывает, напр., при речном судоходстве. Ничто подобное[1] не может быть применено в воздухоплавании. Необходимо найти упор в самом воздухе, подобно тому, как при движении на воде или в воде находят упор в самой этой жидкости. Двигающую силу можно при этом получить или найти точку опоры, пользуясь только тем самым сопротивлением воздушной среды, против которого приходится бороться и которое составляет причину затраты на перемещение. На основании сказанного, движение воздухоплавательного прибора нельзя сравнивать ни с движением по суше, ни с движением по поверхности воды: там две среды, здесь одна; и если можно проводить параллель, то разве с движением подводного судна или, вообще, с плаванием под водою. Тело рыбы само представляет сопротивление воде, а плавники и особенно хвост, приведенные в движение мускульною силою, сообщают движение всей рыбе также на основании сопроти-

[1] Конечно, за исключением того, практически маловажного случая, когда аэростат перемещается, прикрепленный на канате.

вления, встречаемого ими по отношению к воде. Так, птица, аэростат, или всякий другой прибор, двигающийся в воздухе, могут быть приведены в самостоятельное движение относительно окружающего воздуха только при помощи двигающихся частей и не иначе, как пользуясь законами сопротивления воздуха. Пусть это будут приборы, подобные крыльям птицы или пароходному винту, или наклонная плоскость (как в аэропланах); во всяком случае самостоятельное движение получается не иначе, как на основании законов, управляющих сопротивлением среды. Все различие двигательных приборов (пропеллеров), действующих в жидкой среде, сводится к тому, что одни из них, напр. весла и гребные колеса, действуют, пользуясь прямым сопротивлением, являющимся при их движении, а другие двигательные приборы, как винт, крыло птицы, рыбий хвост и т. п., действуют вследствие реакции, являющейся в направлении ином, чем движение, потому что наклонная плоскость двигательного снаряда содействует разложению силы на ее слагающие. Так, крыло птицы бьет воздух сверху вниз, а вследствие наклонного положения крыла является такая горизонтальная слагающая сила, которая заставляет птицу двигаться вперед. Так точно в пароходном винте движение совершается около горизонтальной оси, а потому прямое сопротивление действует в направлении, перпендикулярном к этой оси, а поступательное движение совпадает с этою осью.

Поэтому задачи дальнейшего развития воздухоплавания тесно связаны с решением задач, относящихся до сопротивления воздуха или, вообще, до сопротивления среды, потому что сущность вопроса о сопротивлении среды не позволяет делать какого-либо разграничения между сопротивлением капельных и упругих жидкостей. Это заставляет нас в дальнейшем изложении не отделять вопроса о сопротивлении воздуха от вопроса о сопротивлении воды. К такому слитному изложению побуждает не только пример всех главных исследователей вопроса, но еще и то существенное обстоятельство, что число опытных исследований для одних газов недостаточно для решения многих основных задач в учении о сопротивлении среды. Опыты с водою дополняют и дополняются опытами с воздухом. Получится еще и та выгода, что свод данных о сопротивлении среды приобретает интерес не только в применении к воздухоплаванию, но и в применении к плаванию по воде.

Однако, прежде чем приступить к изложению современного состояния учения о сопротивлении воды и воздуха, считаю полезным мотивировать вышеупомянутое слияние ученья о двух средах, столь, повидимому, различных между собою, приведя для того некоторые наведения, почерпаемые из соображений и из опыта или наблюдения.

Еще до Ньютона, а особенно вследствие его теоретических и опытных исследований, сопротивление среды рассматривалось и ныне продолжает рассматриваться без ближайшего знакомства с качествами среды, потому, прежде всего, что многие опыты заставляют утверждать, что сопротивление среды зависит *почти* исключительно от ее плотности, а не от каких-либо других ее качеств. Это особенно справедливо для средних скоростей движения. При очень малых скоростях сцепление частиц среды, столь громадное у твердых тел и еще значительное у капельных жидкостей,[1] сцепление, гораздо меньшее у газов, оказывает, по мнению большинства исследователей, свое заметное влияние. Оттого в опытах Кулона двигающаяся в жидкости поверхность представляла при медленных движениях значительно различные сопротивления в масле и в воде. Когда скорость возрастает, растет сопротивление, сцепление же частиц остается неизменным, и работа, идущая на его преодоление, становится ничтожно малою сравнительно со всею остальною массою затрачиваемой работы, а потому тогда движение плоскости в масле и в воде будет встречать сопротивление, *различное только вследствие разной плотности масла и воды* и почти не зависящее от разности сцепления. Обычный случай сопротивления жидкости можно представить поэтому подобным переливанию жидкости с одного места на другое, на что расходуется работа, зависящая, прежде всего, от плотности жидкости, при одном и том же объеме переливаемой жидкости. Станем ли мы производить сопротивление от инерции жидкости, как это делали Ньютон и его последователи, или будем его считать происходящим преимущественно от трения, как то признают Ранкин и его последователи, во всяком случае надо допустить тесную связь между основными причинами сопротивления и плотностями жидкостей, потому что таков результат опытных исследований.

При движении в жидкой среде сзади двигающегося тела образуется свободное пространство, замещаемое жидкостью. Очевидно, во-первых, что смотря по качеству жидкости и по скорости движения, кормовое пространство будет замещаться жидкостью более или менее скоро и полно, во-вторых, что падающая на корму жидкость будет содействовать движению тела, а потому, когда движение будет столь быстро, что за кормою будет образовываться свободное[2] или разреженное пространство, тогда сопротивление будет возрастать с возрастанием скорости быстрее, чем обычно, т. е. чем тогда, когда

[1] Оно измеряется в капиллярных явлениях и проявляется в липкости, временах истечения, в подвижности и т. п. свойствах жидкостей.

[2] Известный французский адмирал г. Дюпюи-де-Лом сообщил мне в 1878 г., что при испытании очень быстроходных новых французских миноносок далее 20 узлов он наблюдал, что при уклоне руля, около него, во всю его высоту, образуется сквозное свободное пространство, не занятое водою.

тело будет получать удары от жидкости, наступающей на корму. Так как скорость вступления жидкостей в пустоту зависит от свойств жидкостей, то, начиная с некоторой скорости, сопротивление всякой жидкости будет возрастать быстрее, чем до того. Но это касается и до капельных и до упругих жидкостей. Для последних есть измерения сопротивлений при очень больших скоростях, получающихся при полете артиллерийских снарядов. Эти измерения действительно показывают тогда значительное возрастание сопротивления. На основании этого не должно, однако, считать сопротивление воздуха глубоко отличным от сопротивления воды, потому что должно думать, что если бы исследовались движения в воде при значительных скоростях, получились бы и здесь такие же явления.

Если движение происходит в воздухе или, вообще, в упругой среде, то пред двигающимся телом плотность среды возрастает тем больше, чем легче сжимаема и чем менее подвижна жидкость, а за двигающимся телом плотность уменьшается; по этому должно ожидать для упругих жидкостей, при больших скоростях, сопротивления, возрастающего не только в прямой зависимости от скорости и плотности, но и еще в большей мере вследствие того, что сгущенная жидкость впереди тела будет оказывать более значительное сопротивление, а разреженное сзади пространство будет заставлять тело двигаться медленнее, толкая его как бы в обратную сторону. Этими соображениями достаточно объясняется значительное возрастание коэфициента сопротивления воздуха[1] с возрастанием скорости, как видно из определений сопротивления артиллерийских снарядов. Если же речь идет о таких небольших скоростях, не превышающих 10—20 м в секунду, какие встречаются в действительности при движении рыб, птиц, пароходов, поездов и т. п., то тогда сопротивление среды с достаточною точностью определяется ее нормальною плотностью, т. е. возрастает с ее увеличением прямо пропорционально.

Так должно думать потому, что непосредственными опытами доказывается, что, несмотря на громадное различие плотностей воды и воздуха, сопротивление той или другой среды — одно и то же, приняв во внимание одно различие их плотностей. Так,

[1] Коэффициентом сопротивления мы станем называть частное из величины сопротивления на квадрат скорости, при данных других свойствах жидкости и тела, напр. при плотности среды = 1, при наибольшем сечении тела (по направлению, перпендикулярному к направлению движения) = 1. Для шара при метрической мере, при плотности среды = 1 (считая плотность воды или вес куб. метра в кг = 1000) и при величине большего круга = 1 м², коэффициент сопротивления для обычных скоростей, не превышающих 10 м, близок к 0.03 кг (если скорости выражены в метрах), а при скоростях в 400—500 м коэффициент сопротивления шара достигает 0.05, даже 0.053 кг, как видно из французских и русских артиллерийских определений.

напр., из опытов над движением шарообразных тел в воздухе и в воде (что мы рассмотрим подробно впоследствии) оказывается, что на каждый кв. метр наибольшего поперечного сечения двигающегося шара, при скорости равной 1 м в секунду, сопротивление среды близко к 0.03 кг, или 30 г, если вес куб. метра среды равен 1 кг. Поэтому, так как куб. метр воды весит 1000 кг, сопротивление воды близко к 30 кг. Воздух при температуре в 0° и 760 мм давления весит всего 1.29 кг на куб. метр, а потому сопротивление такого воздуха противу шара, имеющего сечения 1 кв. м, при скорости 1 м в секунду, близко к $0.03 \cdot 1.29$, или к 0.0387 кг. Атмосферный воздух изменяет свою плотность, смотря по температуре, высоте над уровнем моря, или с давлением и от степени влажности, а потому и сопротивление воздушной среды изменяет свою величину, смотря по плотности. Следовательно, говоря о сопротивлении воздуха, необходимо уже принять во внимание его изменение с переменою плотности, а это и достигается проще всего, когда исследование сопротивления относится и к такой плотной среде, как вода, и к такой редкой, как воздух, обращая каждый раз внимание на плотность.

Не надо забывать, что с уменьшением сопротивления, вредящего движению, уменьшается и то сопротивление, при помощи которого может быть производимо направление воздухоплавательного прибора. Так, напр., удар крыльев, произведенный с известною быстротою на значительной высоте, будет представлять меньший упор в воздухе, чем близ поверхности земли, где воздух более плотен. Поэтому в целом выводе, касающемся самостоятельного движения в воздухе, можно также не обращать внимания на плотность среды.

Теоретически это выражается тем, что мерою сопротивления считают вес жидкого столба, имеющего основанием наибольшее поперечное сечение (мидель), а высотою ту высоту H, которая при свободном падении тел соответствует скорости v движения и которая $H=\frac{v^2}{2g}$, где g есть ускорение тяжести. Поэтому очевидно, что свойства среды при таком рассмотрении вовсе не принимаются в расчет и подразумеваются в весе столба жидкости.

Практически также доказана возможность из совокупности сведений о сопротивлении, касающихся до воды, судить о сопротивлении в воздухе по тому, что сделано Дюпюи-де-Ломом. В 1870 г. он сделал расчеты, относящиеся до аэростата, приняв только те данные, которые получены для воды, и на основании этих соображений, при данной движущей силе, размере и формах аэростата и при заранее определенных скоростях и размерах винтового двигателя, расчел, какую самостоятельную скорость должен получить аэростат. При опытах, сделанных 2 февраля

1872 г., собраны наблюдения, из которых можно видеть, что предварительные расчеты о скорости самостоятельного движения аэростата вполне подтвердились в действительности. Следовательно все данные для сопротивления воды прямо можно применять к воздуху, приняв в расчет разность плотностей.

И так мы будем рассматривать совместно сопротивление воды и воздуха. В этом рассмотрении мы будем держаться следующего порядка. Сперва познакомимся с общим состоянием всего вопроса и с теми гипотезами и теориями, которые были применяемы к его разрешению. Этому посвящается вся следующая глава. В ней мы однако избегаем математического развития и подробностей теоретических и опытных расчетов, а ограничиваемся только указанием на исходные пункты гипотез и на некоторые из получаемых выводов. Так поступаем мы в виду того, что ни одна из многих теорий сопротивления не оказалась удовлетворяющею действительности, хотя каждая из главных была побудительницею к некоторому дальнейшему движению всего учения о сопротивлении и соответствует той или иной стороне сложной задачи. В виду же того, что развитие теоретических построений, касающихся сопротивления, имеет самостоятельный интерес, я считаю не излишним в особенном приложении изложить некоторые из важнейших теорий сопротивления, а особенно Ньютонову теорию сопротивления среды. Вследствие недостаточности теории сопротивления, зависящей от сложности задачи, приходится в сущности руководствоваться результатами опытных данных. Им посвящаются две особые главы. В одной из них я описываю все, которые мне были известны, достоверные и систематические исследования о сопротивлении тел определенных форм, распределив их по методам исследования. При этом я старался собрать по возможности бо́льшее количество численных данных прямых опытов и сделать их сличимыми, приведя их все к метрической системе. В то же время я старался дать практическую оценку полученным результатам, что положительно необходимо в виду разноречия многих из добытых результатов. Это изложено во 2-й главе. Третья глава посвящается выводам из опытных данных таких, по возможности достоверных, результатов, какие нужны для практической стороны вопросов о воздухоплавании.

Считаю долгом оговориться здесь в том отношении, что вопрос о сопротивлении среды занял меня сперва только по отношению его к воздухоплаванию. Приступая к изучению сопротивления, я, признаюсь, не ожидал найти такие недостатки в теории и в опытах, до него касающихся, какие оказались в действительности. Надобно было думать, что в применении к кораблестроению и кораблевождению вопрос разработан с полнотою. Оказалось, что корабли строят и по сих пор ощупью,

пользуясь многоразличною практикою, а не расчетом, основанным на теории или опытах сопротивления. В таком деле, как плавание по воде, это и возможно. Опыт веков уже велик, и ощупью, догадкою и наблюдательностью можно улучшать то, что давно существует. Не таково воздухоплавание. Опыты полета, за исключением аэростата, который до сих пор не властелин, а раб ветров, поныне были, как известно, еще мало успешны. А между тем птицы летают, аэростатом уже сумели бороться противу слабого ветра, а потому есть уверенность и в том, что когда-либо достигнут и полной победы над воздухом, станут управлять полетом. Только для этого очевидно необходимо точно знать сопротивление воздуха, хотя бы на столько, чтобы им воспользоваться для первых, пока грубых, попыток борьбы с атмосферою. Все изложение учения о сопротивлении я подчиняю этой основной цели всего сочинения и стараюсь в вышеупомянутой последней главе свести то, что сюда прямо относится. Недостаточность опытных данных о сопротивлении среды для полного решения задачи воздухоплавания, однако, столь очевидна, что я считал невозможным умолчать о неизбежной необходимости новых точных опытов, о их цели, о необходимых приемах и о средствах, для выполнения их нужных. Этим недостатком точных опытных данных о сопротивлении среды объясняется в одно и то же время причина слабого развития как общей теории сопротивления среды, так и практики воздухоплавания. Само мореплавание должно много выиграть от новых точных опытов над сопротивлением, потому что вслед за ними несомненно явится более удовлетворительная, чем ныне существующие, теория сопротивления среды, а тогда возможнее, чем ныне, будет достичь в морской архитектуре таких целей, которые вызываются практикой, т. е. наибольших скоростей хода при наименьшей трате топлива, при наибольшей вместимости и надлежащей устойчивости, поворотливости и прочих свойствах корабля. Если мне не по силам дать дальнейшее движение таким важным вопросам, как все вышеуказанные, то я по крайней мере стараюсь облегчить путь дальнейшим деятелям, собрав здесь все, что считаю наиболее важным, и указывая те способы опытного исследования, какими, по моему мнению, дело может быть подвинуто далее, чем при современном состоянии знаний о сопротивлении среды.

Глава I

Важнейшие сведения о сопротивлении среды

Первым побуждением к зарождению знаний о сопротивлении среды послужило изучение движения падающих тел. Галилей и Флорентинская академия были и здесь, как во многих других

частях механики и физики, начинателями дела. Первые опыты Риччиолли (1640—1650), равно как одни из полнейших для того времени опыты Мариотта и Ла-Гира (1679—1714) представляют именно исследование времен падения тел в воде и воздухе. Стали понимать, что воздух весомое тело, а потому и узнали, что он, как вода, замедляет падение и движение вообще.

Общие, сами собой понятные соображения и немногие опыты, произведенные в это время, дали уже повод считать сопротивление среды пропорциональным площади сечения, плотности среды и некоторой степени скорости. Затем учение о сопротивлении среды развивалось преимущественно под влиянием двух практических направлений, требующих знакомства с этим предметом, а именно: мореплавания и артиллерии; двигающийся в воде корабль и летящий в воздухе снаряд представляют ясные примеры важного значения законов сопротивления среды, потому что там и здесь двигатель расходует, если не всю, то значительную долю своей силы на борьбу с сопротивлением среды. Теоретические исследования Ньютона над сопротивлением среды, изложенные во 2-м томе его знаменитого творения: „Philosophiae naturalis principia mathematica", составляют исходную точку всего дальнейшего движения сведений об этом предмете. Ньютон также производил (1710—1719) опыты падения шарообразных тел в воде и в воздухе и воспользовался ими для суждения о сопротивлении среды. Но он первый пошел в деле решения задач сопротивления, кроме опытного способа, путем чисто теоретическим и опытными исследованиями старался только узнать, какую из (трех) гипотез, которые он имел в виду, должно признать за отвечающую действительности.

Строго говоря, не то, что теперь, а во время самого Ньютона он сам, из своих собственных опытов, легко должен был заключить, что ни одна из имевшихся у него в виду (трех) гипотез, объясняющих сопротивление среды, не удовлетворяет действительности. [1] Тем не менее исходные соображения Ньютона долго и крепко держались в науке, и ради этого мы их излагаем здесь в том виде, в каком они наиболее подходят к действительности и как они излагаются в большинстве сочинений конца прошлого

[1] Три гипотезы Ньютона суть: 1) жидкость редкая упругая, состоящая из упругих частиц, 2) жидкость редкая упругая, состоящая из неупругих частиц, и 3) жидкость сплошная. Для шара (r радиус) получается по первой сопротивление $= 2h\pi r^2\Delta$, по второй $= h\pi r^2\Delta$, по третьей $\frac{h}{2}\pi r^2\Delta$, где h есть высота, отвечающая скорости, Δ плотность. Для воздуха и воды Ньютон получил по опыту результат близкий к третьей гипотезе, а нельзя же воздух счесть неупругою жидкостью. Кроме того, эта третья гипотеза, оправдавшаяся для шаров, сама по себе очевидно не отвечает действительности, потому что по ней сопротивление шара и цилиндра при одном сечении одинаково, чего нет в действительности и что не мог, конечно, думать сам Ньютон.

(после Эйлера) и начала нынешнего столетия. (Собственные мысли Ньютона изложены отдельно, в первом приложении к этой книге). Эти, отчасти видоизмененные мысли Ньютона, многие называли „обыкновенною теорией" (théorie ordinaire) сопротивления.

Ньютон должен был, конечно, задаться некоторыми гипотезами для того, чтобы иметь возможность подвергнуть математическому исследованию тот невидимый процесс взаимодействия между телом и частицами среды, который составляет причину сопротивления среды. Ни точных наблюдений, ни тем паче каких-либо точных законов сопротивления, которые могли бы лечь в основу математического анализа, могли бы служить поводом для составления удовлетворительной гипотезы — ни у Ньютона, ни у других математиков, занимавшихся этим вопросом, — не было. Пришлось задаться произвольными гипотезами, берущими начало в первом знакомстве с предметом — в наблюдении, а не в измерении или опыте. А если явление сложно, как сопротивления среды, то такой путь не приводит никогда к верным, согласным с природою следствиям. Это видно во всем историческом развитии точных знаний. Вывод этот можно выразить кратко примером из астрономии: Ньютон силен только Кеплером. Ньютонова гипотеза тяготения согласуется с природою, даже и зарождается в голове Ньютона, только потому, что ранее Кеплер свел, извлек из массы наблюдений действительные законы движения планет. Гипотеза Ньютона есть плод этих выводов и ими одними она сильна, делается действительною теориею, захватывающею все частности природного явления. Нельзя и думать, чтобы такая верная гипотеза зародилась без суммы точно известных фактов, или при помощи одного общего знакомства с явлениями. Хотя такая случайность мыслима, но ее нет в истории знаний. И немудрено, что в сложном вопросе сопротивления среды, без точного знакомства с действительностью, Ньютон и другие теоретики задались гипотезою, совершенно не удовлетворяющею природе явлений. Обыкновенно, вслед за Ньютоном, считали сопротивление зависящим от удара передней части движущегося тела о шарообразные частицы среды, — которые, раз ударившись о поверхность тела, навсегда ее оставляют и действуют независимо друг от друга. При такой гипотезе сопротивление среды сводится к ясному и простому вопросу об ударе тела. Все сомнение в приложении к действительности ограничивается при этом обыкновенно вопросом о мере упругости ударяющихся тел. Можно было бы ждать поэтому большого различия между сопротивлением газов и капельных жидкостей и можно было бы думать далее, что задняя, кормовая часть движущегося тела не оказывает влияния на сопротивление, — а это не отвечает действительности. Также

мало соответствует ей основная формула, выводимая из гипотезы и приноровленная при помощи коэффициента K к действительности, а именно:

$$R = KM\Delta v^2 \sin^2 \alpha, \text{ [1]} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (I)$$

где R есть прямое давление или сопротивление (число килограммов), испытываемое телом в направлении движения; K — постоянный коэффициент, одинаковый для всякой среды и для всех тел, M — величина (кв. метры) плоскости, представляющей проекцию движущейся плоскости (или призматического тела, двигающегося по своей оси, потому что в обоих случаях проекция одна) на плоскость, перпендикулярную к направлению движения (в случае призмы — M есть сечение призмы, в шаре это есть площадь большого круга, в корабле — плоскость миделя); Δ — вес (килограммы) одного объема (одного куб. метра) жидкости, в которой происходит движение (в случае воды Δ близка к 1000, для морской воды к 1020, для воздуха к 1.2); v — скорость (в метрах), т. е. путь, проходимый в одну секунду; α — угол, образуемый переднею плоскостью с направлением пути (с осью призмы).

Обходя подробности изложения гипотезы [2] и вывод следствий, укажем только главные руководящие соображения Ньютона и его ближайших последователей в теоретической части учения о сопротивлении среды. Взаимодействия жидких частиц, равно как и трение частиц среды о движущееся тело, первые исследователи считали столь малыми сравнительно с теми затратами, которые идут на перемещение частиц, что вовсе не приняли в расчет при определении сопротивления. Другими словами это значит, что *все* сопротивление среды приписывалось ее *инерции*, т. е. всю затрату силы и двигателя считали происходящею от

---

[1] Мы увидим далее, что такая же точно формула удовлетворяет и тому случаю, когда рассматривается сопротивление, перпендикулярное к плоскости, если на место величины M поставить величину самой плоскости при наклоне α. В этом последнем виде часто при математическом исследовании предмета применяют формулу сопротивления. Но в практическом применении приличнее для сущности дела относить сопротивление к проекции тела, а не к его поверхности (напр. к миделю корабля, а не к его передней боковой поверхности) и определять только то сопротивление, которое действует в направлении пути, а не в направлении, перпендикулярном к плоскости движущегося тела, а потому мы придали здесь всем множителям формулы сопротивления вышеуказанное значение. Так как значение членов, входящих в основную формулу сопротивления, должно быть вполне ясно усвоено для знакомства с сопротивлением, то вслед за сим я считал нужным развить приложение формулы сопротивления для разных простейших случаев ее применения. Считаю также полезным упомянуть здесь, что вышеприведенный вид формулы сопротивления, отвечающий идеям Ньютона, дан был не им самим, а его последователями, но был почти тот же у Pardies в 1670 г. (См. „Gehler's Phys. Wörterbuch", X, p. 1810).

[2] Они изложены в прибавлении, сопровождающем эту книгу.

необходимости сдвинуть, вывести из покоя массу жидкости, уступающей свое место движущемуся телу. При таком представлении, конечно, можно было уподобить весь механизм сопротивления удару тел. Относительно этого последнего, как известно, должно отличать удар упругих тел (как биллиардный шар) от удара неупругих тел (каков до некоторой степени свинец). Природные же тела занимают средину, потому что нет ни совершенно упругой, ни абсолютно неупругой материи. Если представим, что в неподвижной среде плоскость движется в направлении нормальном к каждой линии, на ней лежащей, т. е. угол между плоскостью и направлением ее движений есть прямой ($\alpha = 90°$, $\sin\alpha = 1$), то очевидно прежде всего, что сопротивление, по смыслу вышеприведенного представления о нем, будет пропорционально величине плоскости (M в уравнении 1) и что, при той же скорости, оно будет возрастать пропорционально плотности среды Δ, потому что масса сдвигаемых частиц среды возрастет с величиною плоскости и числом частиц, содержащихся в одном объеме.

Так как при возрастании скорости не только возрастает число частиц, ударяющих о тело, но еще и сила удара, то и должно ждать возрастания сопротивления пропорционально квадрату скорости (v^2). С изменением уклона плоскости к направлению движения, о данную плоскость ударяет очевидно во столько раз меньшее число частиц, во сколько синус угла меньше синуса прямого угла, т. е. единицы; сверх того в направлении движения встречается при этом лишь уменьшенное сопротивление, потому что сила удара разлагается по направлению параллельному плоскости и по направлению ей перпендикулярному, из которых действует только последняя слагающая. Но и она, в свою очередь, разлагается на две силы: одну параллельную движению, другую перпендикулярную к ней. Обыкновенно исследуется только эта последняя. Другая слагающая сопротивления перпендикулярна пути и составляет то реакционное действие сопротивляющейся среды, которое сжимает бока судна во время движения его в бо́льшей мере, чем в покойной воде. Эта же перпендикулярная слагающая служит для подъема змейка, действует при ударе крыльев, при работе винта и т. п. Если ограничиться одним прямым сопротивлением, т. е. параллельным движению, то легко вывести, что для призмы, двигающейся по направлению оси, при уклоне ее передней плоскости на угол α, сопротивление получается пропорциональным квадрату синуса угла встречи. Так как закон этот исторически весьма важен, мог бы иметь действительно важное значение при расчете сопротивления тел, ограниченных кривыми поверхностями, если бы был справедлив, и так как в приложении закона квадрата синусов должно ясно отличать некоторые определенные случаи, то

мы и рассмотрим, в смысле Ньютоновых гипотез, сопротивление наклонной плоскости, считая сопротивление прямой плоскости (уравнение 1, полагая $\sin\alpha=1$, ибо $\alpha=90°$) $R_1=KM\Delta v^2$. Для ясности представим (чертеж 1) призму, двигающуюся по направлению, указанному стрелкой, и параллельному оси призмы. По смыслу всего Ньютонова учения, сопротивление ее равно сопротивлению ее конечной плоскости *abcd*, потому что она одна принимает удары частиц среды. Величину передней поверхности *abcd* назовем через S_1, и пусть угол, образуемый с направлением движения или осью призмы, т. е. угол *eac* или *fbd*, равен α. Назовем затем через M сечение *efgh* призмы плоскостью, перпендикулярною к оси или к направлению движения. Очевидно, что $M=S\sin\alpha$. Выразим линиею *mn* меру давления или сумму сил сопротивления R_1 на призму, если ее передняя плоскость перпендикулярна к направлению пути. Требуется определить меру сопротивления R в том случае, когда передняя плоскость призмы имеет уклон α. Разложим $mn=R_1$ на две слагающие: *no* перпендикулярную к плоскости и *mo* ей параллельную. Последняя будет участвовать только в трении, которое вовсе не рассматривается Ньютоном и его ближайшими последователями. Остается только сопротивление, выражаемое линиею *on*. Назовем его через R_2. Это будет сопротивление, перпендикулярное к плоскости. Величину его легко найти, потому что $on=mn\sin\alpha$, ибо в прямоугольном треугольнике *mon* линия *mn* параллельна *ae*, а линия *mo* параллельна *ac*, угол же $cae=\alpha$, а потому и $omn=\alpha$. Отсюда очевидно, что

$$R_2=on=mn\sin\alpha=R_1\sin\alpha=KM\Delta v^2\sin\alpha=KS\Delta v^2\sin^2\alpha \quad . . (II)$$

Эта формула, на вид совершенно тождественная с (I), выражает в сущности совершенно иное, чем (I), потому что S есть действительная мера (а не проекция, как M) передней плоскости движущейся призмы, а R_2 есть сопротивление *on*, к ней перпендикулярное и следовательно образующее угол $90°-\alpha$ с направлением движения. Если бы захотели измерить эту величину R_2, то должно было бы двигать плоскость *abcd* в направлении, указанном стрелкою, а пружинные весы или динамометр укрепить перпендикулярно к плоскости, а не в направлении, указанном стрелкою, как для определения R или R_1. Сопротивление R_2 в действительных применениях практики удобнее всего разлагать на две новые слагающие: одну R искомую, направленную по оси призмы, а другую ей перпендикулярную, а потому перпендикулярную к направлению движения. Сопротивление первого рода мы везде в этом сочинении будем называть или просто *сопротивлением*, или *прямым*, или *параллельным сопротивлением* и будем означать через R (Résistance), а сопротивление, перпен-

дикулярное направлению движения, станем называть или *перпендикулярным сопротивлением*, или *реакционным*, или просто реакцией [1] и станем означать через Q. Очевидно, что при $\alpha = 90°$ $R = KM\Delta v^2 = KS\Delta v^2$, потому что $\sin 90° = 1$ и проекция M = самой площади S. Тогда реакция $Q = 0$. Она является только при некотором уклоне. Когда *on* есть, движущаяся, наклонная книзу поверхность поднимается, что и составляет реакционное действие сопротивления. Если плоскость движется по направлению одной из линий, на ней самой находящейся, конечно, опять $Q = 0$, а по смыслу Ньютонова учения, тогда и $R = 0$. Наша задача состоит теперь в том, чтобы, зная $R_2 = on$, определить R и Q, руководясь не гипотезою Ньютона, а смыслом самого понятия о силе сопротивления. Для этого стоит только построить на *on* параллелограмм, и станет очевидно, что *on* заменится двумя слагающими: *nr* параллельною пути и равною R и *nq* или *or* перпендикулярною к пути и равною реакции Q. Из того, что *nq* и *or* перпендикулярны к *ae*, а *on* к *ac*, следует, что в прямом треугольнике *onq* угол $onq = eoc = \alpha$, а потому

$$Q = nq = or = on\cos\alpha = R_2\cos\alpha = KM\Delta v^2\sin\alpha\cos\alpha = KS\Delta v^2\sin^2\alpha\cos\alpha \quad \text{(III)}$$

$$R = rn = oq = on\sin\alpha = R_2\sin\alpha = KM\Delta v^2\sin^2\alpha = KS\Delta v^2\sin^3\alpha \quad \text{(IV)}$$

Это последнее выражение (IV) тождественно с (I). Таким образом, по смыслу гипотезы Ньютона, находится прямое сопротивление R_1 для призмы, кончающейся перпендикулярною плоскостью, если она движется по своей оси, затем отыскивается по той же гипотезе [2] сопротивление R_2, перпендикулярное плоскости и в том случае, когда призма кончается наклонною плоскостью, если движение все-таки происходит по оси призмы; наконец, зная R_2, можно, уже не пользуясь гипотезою Ньютона, а просто применяя параллелограмм сил, найти отношение параллельного и перпендикулярного сопротивления. Если R_2 совершенно неизвестно, все же $\frac{Q}{R} = \frac{R_2\cos\alpha}{R_2\sin\alpha} = \operatorname{ctg}\alpha$. Следовательно, помимо всяких других гипотез (а следовательно и помимо приложения учения о трении к вопросу о сопротивлении), только применяя закон параллелограмма сил, имеем:

$$\left.\begin{aligned} Q &= R\operatorname{ctg}\alpha \\ R &= Q\operatorname{tg}\alpha \end{aligned}\right\} \quad \text{(V)}$$

---

[1] Эта слагающая служит для подъема змейка, для поступательного движения птицы, ударяющей крыльями, рыбы, действующей хвостом, для действия ветряной мельницы и для развития поступательного движения пароходным винтом.

[2] Потому что трение принимается равным нулю.

А так как $\operatorname{ctg} 45° = 1$, то при $\alpha = 45°$ прямое действие = реакции, при углах менее 45° котангенс более единицы, а потому при малых углах реакция более прямого сопротивления. При углах бо́льших, чем 45°, реакция меньше прямого сопротивления. При 90° реакция = 0, потому что тогда $\operatorname{ctg}\alpha = 0$, при углах, близких к 0°, она наибольше превосходит прямое сопротивление, потому что при $0°$ $\operatorname{ctg}\alpha = \infty$.[1] Мы останавливаем внимание на отношениях, выраженных уравнением (5), особенно для того, чтобы показать два важных обстоятельства, находящиеся в связи со всем учением о сопротивлении среды. Во-первых, то, что отношение прямого сопротивления к реакции выводится независимо от Ньютонова учения о сопротивлении, а во-вторых, то, что, зная одно из этих двух сопротивлений, можно узнать и другое, а потому все равно, которое из них и изучать. Конечно, и тот вывод, который выражен в уравнении (5), требует практической проверки, чтобы получить действительную прочность. К сожалению, здесь должно ограничиться только одним рядом наблюдений, сделанных в 1871 г. членами лондонского аэронавтического общества Wenham'ом и Browning'ом на заводе Пенна в Гринвиче, где можно было воспользоваться большою воздуходувною машиною для того, чтобы направить струю воздуха на наклонные площадки. При этом непосредственно и единовременно определялись обе слагающие: параллельная движению и перпендикулярная. Во 2-й главе будут описаны эти опыты и приведены подлинные числа, помещенные в „Sixth Annual Report of the Aëronautical Society of Great Britain (for the year 1871, p. 76), здесь же я помещаю только средний вывод, извлеченный мною из всех данных опыта, а именно: при такой средней скорости дутья, что давление водяного манометра было=0.77 дюйм, поверхность (S) в один кв. фут испытывала давления:

При	$\alpha = 90°$	60°	45°	15°	
Параллельное	$R = 3.81$	3.17	2.77	0.49	фунт.
Перпендикулярное	$Q = 0$	1.86	2.77	1.94	„
	$\frac{Q}{R} = 0$	0.587	1.00	3.96	
	$\operatorname{ctg}\alpha = 0$	0.577	1.00	3.73	

Так как в опытах не было большой точности, то различие между значениями $\frac{Q}{R}$ и $\operatorname{ctg}\alpha$ должно считать находящимися в пределе точности наблюдения, а потому и вывод (5), свободный от Ньютоновой теории и согласный с опытом, должно считать, пока не получится других более точных данных, за верный, опытом доказанный. А потому в дальнейшем изложении этой

[1] В сущности при $\alpha = 0$ величина прямого сопротивления не равна нулю, равна трению.

главы и в дальнейшем разборе теории сопротивления мы ограничимся только одним прямым сопротивлением R, параллельным с направлением движения.

Здесь однако следует сделать еще одну оговорку. В предыдущем опытном примере мы сочли за сопротивление, испытываемое движущимся телом, то давление, которое испытывает неподвижная плоскость, когда на нее движется среда, а не тот обычный случай, когда среда неподвижна, а тело в ней движется. Оба явления постоянно теоретически рассматриваются как одно и то же явление. Принимается в расчет относительная скорость и считается безразличным — движется ли среда и давит на неподвижное тело, или движется тело и испытывает сопротивление, или движется и тело и среда, но есть разность в скорости их движения. Лишь бы относительная скорость или разность скоростей была одна и та же, давление или сопротивление повидимому ничем друг от друга не должны отличаться. Такое представление несомненно при прямом применении к Ньютоновой гипотезе. Мы увидим, однако, далее, что, судя по наблюдениям Дю-Бюа и Дюшемена, а также и согласно с авторитетным мнением Понселе, который в этом отношении следует (хотя и с оговоркою) за названными исследователями, должно отличать оба случая, и давление, испытываемое неподвижным телом в движущейся среде (напр. в реке или под ветром), иное, чем сопротивление, испытываемое телом при движении в среде, если скорости, плотность среды, формы и размеры тела одни и те же. Впрочем, за названными учеными почти никто другой не следует, и нам в дальнейшем изложении придется только изредка касаться того случая, когда тело неподвижно, а среда движется, потому что опытные данные, в этом направлении собранные, весьма ограничены. Такова шаткость всего учения о сопротивлении, что даже столь элементарный вопрос, как здесь упомянутый, несмотря на большую важность его решения, до сих пор вовсе не обставлен такими опытными данными, которые не оставляли бы сомнения в его решении в ту или другую сторону. Решая, как то делают обыкновенно исследователи вопроса о сопротивлении, этот вопрос при помощи одних соображений, нельзя думать о правильном ходе в развитии знания, потому что история точных наук показывает, что предубеждения ученых неоднократно оказывались не больше, как суеверием, т. е. неумышленною ложью. Для возможности дальнейшего развития учения о сопротивлении и для расширения той области, из которой можно добывать полезные опытные данные, необходимо решить указанный вопрос в ту или другую сторону рядом положительных наблюдений над сопротивлением данного тела при движении его в безграничной неподвижной среде и над тем давлением, которое испытывает то же тело, неподвижное в двигающейся среде (вода и воздух). Те и

другие опыты могут быть произведены при помощи одних и тех же весов или динамометров и, если бы только не был столь соблазнителен кажущийся верным, а в сущности шаткий, теоретический путь исследования вопросов сопротивления, наверное исследования этого рода были бы уже давно выполнены. Мне кажется, при знакомстве с развитием исследований о сопротивлении среды, что здесь более, чем во многих других частях физико-механических знаний, ясно сказалось такое обстоятельство, которое часто проходит незамеченным при изучении точных знаний: применение математического анализа к разработке мало исследованной области знаний придает ей лживый образ некоторой законченности, отбивающей охоту от изучения предмета опытным путем, потому что людям, привыкшим искать в опытном методе решения задач и ждущим от природы прямого ответа на заданные вопросы,—таким людям, нередко слабо владеющим математическим анализом, кажется он способным охватить всю сложность неизученного природного явления и думается, что после него дело и весь интерес опыта состоит только в проверке или опровержении теории. Лица же, владеющие анализом, редко имеют способность и склонность сочинить и выполнить опыт, могущий дать дельный ответ на вопрос, заданный природе. Приложение этих соображений видно во всей истории занимающего нас предмета. Особенно разителен долгий застой в вопросе сопротивления, последовавший за Ньютоном. Почти целое столетие длилось то время, когда Ньютон со своей теорией сопротивления был единственным авторитетом. Поэтому мы возвращаемся к разбору ньютоновых основных положений и приемов.

В основной формуле сопротивления (I) входит коэффициент K, которого значение само собою понятно. Это есть сопротивление в том случае: 1) когда вес куб. меры, напр. куб. метра, или плотность $\Delta=1$ веса, такова, напр., при метрической системе плотность воздуха на некоторой высоте, а именно, напр. на такой, где давление=590 мм, температура=0°, т. е. примерно сказать, на высоте 2000 м от уровня моря; 2) когда M, т. е. плоскость наибольшего поперечного сечения движущегося тела (напр. мидель корабля) равна единице, т. е., считая все данные по метрической системе, когда она равна 1 кв. метру; 3) когда скорость v движения тела в единицу времени, т. е. в 1 секунду, равна единице длины, т. е. 1 метру, и 4) когда синус угла встречи = 1, т. е. когда тело оканчивается прямою плоскостью, перпендикулярною к направлению движения. Само собою разумеется, что величину K можно и должно определить из опыта. Так обыкновенно и делают. Но, задавшись гипотезою Ньютона, эту величину можно также получить расчетом[1] как следствие применения законов удара.

[1] См. 1-е и 2-е приложения.

Если *жидкость принять* за упругую, редкую, но состоящую из *совершенно неупругих* частиц, то расчет приводит к тому, что сопротивление пластинки, перпендикулярной к направлению пути, равно весу столба сопротивляющейся жидкости, который имеет основанием эту самую пластинку, а высота столба равняется двойной высоте соответствующей скорости при свободном падении тел. Закон свободного падения тел, как известно, выражается равенством

$$H = \frac{v_1^2}{2g} = \frac{gt^2}{2},$$

где H — высота падения по истечении времени t (число секунд), v — достигнутая тогда скорость и g — ускорение тяжести, для широты в 45° равное 9.78 м, а для Петербурга = 9.82 м. Поэтому сопротивление перпендикулярной току пластинки равно, при широте 45°:

$$R = \Delta M 2H = M\frac{v^2}{g} = 0.102\,\Delta M v^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (VI)$$

Следовательно, та величина, которую мы выше (I) назвали K, по этому предположению равна 0.102. Долго и многие признавали верность такого заключения, выводимого из основных положений Ньютона, а потому и выражали сопротивление высотою столба, находимого через деление наблюденного сопротивления на вес куб. единицы и на величину плоскости, т. е. определяли $\frac{R}{\Delta M}$ и сличали эту величину с высотою H, отвечающею скорости. Но здесь является в истории предмета чрезвычайно странное обстоятельство. При неупругих частицах и нормальной плоскости следовало получать эту величину $= 2H$, при упругих частицах $= 4H$, при сплошной жидкости $= \frac{1}{2}H$, судя по теоретическому выводу Ньютона, а считали опыт согласным с теориею Ньютона даже тогда, когда $\frac{R}{\Delta M} = H$, чего вовсе нет у Ньютона.

Достаточно для примера сослаться на отчет о знаменитых для своего времени опытах французских академиков д'Аламбера, Кондорсе и Боссю: „Nouvelles expériences sur la résistance des fluides" (1777). На стр. 172 они приводят следующий численный вывод из своих опытов, производившихся в воде.

Нумер опыта	1	12	20	34	48	6
Высота по наблюдению . . . . . $\frac{R}{\Delta M}$ =	0.99	1.32	1.28	1.01	1.43	1.44 дюйм.
Высота, соответствующая скорости $\frac{v^2}{2g}$ =	1.08	1.39	1.19	1.03	1.47	0.84 „

Затем (стр. 175) Боссю (писавший отчет) говорит: из этого сравнения видно, что высота, находимая из данных опыта, и та,

которая соответствует скорости, так мало различаются между собою, что можно эту разность приписать неизбежным погрешностям наблюдения и неполной точности поправок на трение и сопротивление воздуха, необходимых для получения результата. А потому в практических применениях можно допустить: „что прямое (слова отчета) сопротивление плоскостей поверхности, движимой параллельно ей самой, по направлению ей нормальному, в безграничной жидкости, равно весу столба этой жидкости, имеющего основанием самую движимую поверхность, а высотою ту, которая отвечает скорости движения". Согласие с теориею Ньютона было в том, что сопротивление, как и H, оказалось пропорционально v^2 и вышло возрастающим с площадью сечения, но оно вовсе не вышло равным тому, которого можно было ждать по теории, развитой Ньютоном. Надо заметить далее—ни один из опытов, затем произведенных в воздухе и воде, не дал чисел сходных ни с вышеприведенными $H=\frac{R}{\Delta M}$, ни согласных с мнением Ньютона. Все сколько-либо точные опыты дают сопротивление больше, чем следует по равенству $R=H\Delta M$, но меньше, чем по равенству $R=2H\Delta M$.[1] Но и такое обстоятельство не приводит в затруднение некоторых последователей Ньютонова мнения, потому что при предположении *совершенно упругих частиц* расчет, по смыслу гипотезы, дает сопротивление вдвое больше, чем в случае неупругих тел (т. е. дает $R=4\Delta MH$). А как в природе нет ни совершенно упругих, ни абсолютно твердых или неупругих тел, то должно ждать, что сопротивление будет выражаться, по смыслу гипотезы об ударе, некоторою величиною:

$$R=K_1\Delta MH=K_1\Delta M\frac{v^2}{2g}=K_1\,0.0511\,\Delta Mv^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad \text{(VII)}$$

Здесь значение K_1 требуется узнать из опыта. Допустить это, собственно, значит — отвергнуть Ньютона, для которого $K_1=4$, или 2, или $\frac{1}{2}$. Но именно таким образом выражают сопротивление даже многие из исследователей последнего времени. Достаточно сослаться на Понселе, который в своем замечательном сочинении „Introduction à la Mécanique industrielle"[2] весьма подробно разбирает сопротивление среды. Делая вывод из всех рассмотренных им наблюдений над сопротивлением плоскостей (стр. 629), Понселе говорит: „Основываясь на разнообразных соображениях и ожидая новых решающих опытных определений,

[1] Даже среднее из вышеприведенных опытов дает для высоты наблюденной — величину 1.245 дюйм., средняя высота, отвечающая скорости, равна 1.167.

[2] Первое издание 1829 г., второе 1839 г., третье, под редакцией Кретца, относится к 1870 г. Это последнее издание мы только и имеем в виду, цитируя Понселе.

мы предлагаем считать K_1 величиною равною 1.30 для того случая, когда тело движется в безграничной жидкости, находящейся в покое, а для того случая, когда тело остается в покое, жидкость же движется, предлагаю принять $K_1 = 1.85$.[1]

Нельзя согласиться с тем способом, которым иные последователи Ньютона объясняют введение коэффициента $K_1 > 1 < 2$, т. е. признать зависимость этого коэффициента от того, что природные тела (частицы среды и самого движущегося тела) имеют ограниченную упругость. Это потому, что упругость воздуха и воды, а также и разных тел, в них движущихся, никаким образом нельзя признать одинаковою, а потому должно было бы ждать и различного значения K_1 для каждого частного случая, т. е. для каждой жидкости и для каждого тела при той же форме (т. е. при тех же $\sin^2\alpha$); для воздуха, например, можно было бы ждать значения K_1 большего, чем для воды. Этого однако в действительности нет. Ньютон из своих опытов, которые мы в своем месте подробно рассмотрим, заключил, что в случае шарообразного тела сопротивление воды и воздуха должно признать таким, как для сплошных неупругих жидкостей. Это его удивляет, но он остается последовательным и принимает то заключение, какое, казалось ему, дает опыт для шара $\left(K = \frac{1}{2}\right)$. Можно было, значит, думать, что самые жидкости сплошь наполнены материею и что малейшие частицы жидкостей сами по себе неупруги. Это мыслимо, хотя и мало вероятно, потому что противоречит всем другим свойствам материи и совершенно недопустимо для газов. Если же оказывается $K_1 > 1$ и не равною 2, то ссылаться на несовершенную упругость, значит вводить в рассмотрение такую гипотезу, по которой должно отказаться от возможности общего решения вопроса и одно неопределенное свойство материи заменять другим, еще менее определенным.

Ввиду этих соображений, а также и того обстоятельства, что численное значение K_1 не дает столь наглядно и прямо сопротивления, как значение коэффициента K [формула (1)], мы во всем дальнейшем изложении совершенно устраняем применение коэффициента K_1 для высот, соответствующих скоростям. Но так как во многих сочинениях о сопротивлении употребляются величины K_1, то напомним только, что существует следующее соотношение между коэффициентом K_1, соответствующим высоте столба, давящего при сопротивлении, и коэффициентом K, выражающим

---

[1] Так как $K_1 = 2Kg$, то по числам Понселе для движения тела (в формуле 1) значение K близко к 0.0662, если $g = 9.82$, а при движении жидкости K близко к 0.0942, а потому для воды сопротивление $= 66\,Mv^2$ или $94\,Mv^2$ кг, для воздуха, считая $\Delta = 1.2$, сопротивление $= 79\,Mv^2$ или $113\,Mv^2$ г.

силу сопротивления при единице скорости, плоскости и плотности, а именно:

$$K_1 = 2Kg, \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (VIII)$$

где g есть напряжение тяжести, близкое к 9.82 м.

Чтобы уяснить себе простейшим образом тот смысл, какой имеет вышеприведенное значение теоретического коэффициента ($2Kg = K_1 > 1 < 2$), можно рассуждать следующим образом, совершенно оставляя в стороне представление об ударе частиц. Вообразим сосуд, наполненный жидкостью до высоты H, плотность жидкости или вес куб. метра ее опять назовем Δ, а плоскость основания M. Все давление жидкости на дно будет очевидно равно $HM\Delta$. Представим далее, что дно сосуда открылось или опустилось. Жидкость потечет из сосуда, станет падать. Закон Торичелли, столь многократно проверенный,[1] показывает, что скорость истечения v при отверстии будет такая же, как при падении с высоты H, т. е. $v = \sqrt{2gH}$. Следовательно $H = \frac{v^2}{2g}$. Если дно сосуда примет на себя опять всю струю, то очевидно, что опять на него будет давить столб $HM\Delta$. Но этот вес выразит теперь сопротивление R, отвечающее скорости v. Откуда $R = HM\Delta = M\Delta\frac{v^2}{2g}$. Сличая это выражение с (1) и (7), имеем, что $K = \frac{1}{2g}$, или что $K_1 = 1 = 2Kg$. Чтобы видеть затем причину того, что в действительности K_1 более 1, достаточно вспомнить тот общеизвестный факт, что течение жидкости производит, напр. в пульверизаторе или в инжекторе Жиффара, разрежение, а потому утекающая со дна жидкость по другую сторону дна произведет уменьшение давления, а это увеличит сопротивление. И очевидно, что увеличение не дойдет до двойного, а будет меньше его, а потому $K_1 > 1 < 2$.[2]

Итак, французские академики и во главе их Боссю — признавали из своих опытов, что $2Kg = 1$, по опытам же более точным,

---

[1] Мне кажутся особенно назидательными непосредственные (1787 г.) определения, касающиеся удара вытекающей жидкости, сделанные Боссю (Traité d'hydrodinamique, t. II, ch. XIV), который заставлял падать вытекающую жидкость на пластинку, прикрепленную к одному плечу коромысла весов, а на другом плече измерял величину давления грузом, и одни из новейших опытов того же рода, сделанных проф. Буффом (Poggendorff's Annalen, t. CXXVII, p. 497), который ставил в струю короткий конец обращенного сифона и показал, что в открытом длинном конце сифона жидкость поднимается до уровня ее в сосуде, из коего течет струя.

[2] Я думал, что вышеприведенное объяснение закона сопротивления есть простейшее видоизменение Ньютонова катаракта, и полагал, что оно является в первый раз, но нашел недавно у Хагена (Abhandl. d. Academie zu Berlin, 1874, стр. 28) подобное же толкование, хотя и снабженное ошибками и опечатками, извращающими смысл дела.

надо признать, что $2Kg$ более 1, хотя и менее 2. Думалось найти простое значение для коэффициента сопротивления, пришлось опереться на опыт и из него извлечь некоторое практическое значение коэффициента сопротивления. Это есть первое главное опровержение воззрений Ньютона на сопротивление среды. Другое, еще более ясное, видно в том, что сопротивление оказалось по опыту вовсе не пропорциальным квадрату синуса угла встречи α.[1]

После того как в 1775—1777 гг. д'Аламбер, Кондорсе и Боссю произвели свои, исторически весьма важные, опыты над сопротивлением плавающих тел в безграничной жидкости и в узких каналах, два последние из названных исследователей сделали в 1778 г. специальный ряд исследований для определения влияния углов встречи на меру сопротивления, чтобы убедиться в применимости закона $\sin^3\alpha$ к действительности. Заключение, выведенное ими из 69 отдельных опытов, есть следующее, взятое мною из „Traité théorique et expérimental d'Hydrodynamique" par M. l'Abbé Bossut (1787, t. II, p. 411).

„Таблица относительных сопротивлений, испытываемых плавающим телом при той же скорости, в зависимости от изменения носового угла MQN (черт. 2) от 180 до 12 градусов".

Относительное сопротивление, считая сопротивление при $\alpha = 90°$ равным 10 000

Угол MQN	Угол встречи	По теории $= \sin^2\alpha \cdot 10\,000$	По результатам опыта	Разность
180°	90°	10000	10000	—
168	84	9890	9893	3
156	78	9568	9578	10
144	72	9045	9084	39
132	66	8346	8446	100
120	60	7500	7710	210
108	54	6545	6925	380
96	48	5523	6148	625
84	42	4478	5433	955
72	36	3455	4800	1345
60	30	2500	4404	1904
48	24	1654	4240	2568
36	18	955	4142	3187
24	12	432	4063	3631
12	6	109	3999	3890

[1] Заметим здесь, что иные считают угол встречи не между плоскостью и направлением движения, а дополнительный к нему угол между нормалью плоскости и направлением движения. Тогда, очевидно, в формулу взойдет cos вместо sin.

„Из этой таблицы видно (продолжает Боссю), что в действительности сопротивление изменяется иначе, чем изменяются квадраты синусов углов падения: опытные числа различаются от теоретических тем более, чем меньше становится угол падения".

Позднейшие опыты других исследователей, которые мы рассмотрим впоследствии с подробностью, хотя дают иные числа, чем эти, но заключение французских академиков подтверждают, т. е. показывают отсутствие пропорциональности между сопротивлением и квадратом синуса угла падения или встречи.

В истории вопроса о сопротивлении такое заключение было главным поводом к падению Ньютоновой теории и к разысканию новых законов сопротивления. С законом $\sin^2 \alpha$ связана в действительности вся сущность значения Ньютоновой теории, потому что для применения законов сопротивления к случаям практики приходилось применять начала теории к телам, ограниченным кривыми поверхностями, к таким, напр. как нос корабля или шаровая поверхность ядра, а для вывода сопротивления подобных тел необходимо было задаться законом изменения сопротивления, оказываемого элементом поверхности при изменении угла встречи. Сам Ньютон приложил свой закон к шару. Пользуясь следующим общим приемом, легко это произвести. Если закон (1) (считая ли $2Kg=1$ или вообще считая K за величину постоянную) справедлив для плоскостей конечного размера, то он, очевидно, выражает закон сопротивления и бесконечно малой, дифференциальной плоскости. А всякую кривую поверхность можно представить образованною из сопротивления, по некоторому закону, бесконечно большого количества таких площадок. Суммируя, т. е. интегрируя, сопротивление всех этих площадок, можно вывести сопротивление тела, ограниченного кривыми поверхностями. Путь этот[1] совершенно верен для случая удара и был бы вполне приложим к нахождению сопротивления кривых поверхностей, зная сопротивление плоскостей, если бы сопротивление представляло действительное подобие удару и если бы после и кроме удара частиц жидкости о тело не совершалось бы скольжения частиц по поверхности тела, если бы не образовались токи и струи жидкости[2] и если бы вообще не было взаимодействия

---

[1] Подробности такого приема, как и вообще развитие некоторых частных задач, касающихся сопротивления, мы помещаем в приложениях, чтобы избежать в изложении общего состояния вопроса о сопротивлении таких отступлений в ходе мыслей читателя, которые неизбежны при передаче математических рассуждений и расчетов. Здесь, в этой главе, я желал сопоставить воззрения и опыты, насколько они влияли на решение задач сопротивления.

[2] В четвертом приложении к этой книге читатели найдут изложение теории Нордмарка (1808), который, приняв во внимание трение и изменение скорости в движении жидкости, обтекающей тело, вознамерился исправить теорию Ньютона. У Нордмарка есть успех, он уже отчасти подчинился природе и требо-

частиц друг на друга. А все это, конечно, существует; поэтому сопротивление кривой поверхности будет в действительности иным, чем сумма сопротивлений элементарных площадок, на которые можно разбить всякую поверхность. Поэтому вышеуказанный способ нахождения сопротивления тел, ограниченных изогнутыми поверхностями, не может отвечать сущности явления и выражать действительность.

И это тем более справедливо, что самый закон $\sin^2\alpha$, как мы видели выше, не соответствует действительности. Такое мнение о неприложимости Ньютоновых начал к нахождению сопротивлений с особою ясностью и резкостью высказал прежде других известный ученый Борда, капитан французского флота, который в средине прошлого столетия славился как замечательный ученый и который навсегда оставил после себя много исследований и приемов, отличающихся большим изяществом и точностью. Борда в 1763 г. высказался совершенно ясно противу Ньютоновой теории сопротивления, потому что все его немногочисленные, но ясные опыты с нею несогласны. Вышеупомянутые обширные опыты французских академиков, произведенные в следующем десятилетии, были несомненно только ответом на вопросы, возбужденные опытами Борда. Они описаны в „Histoire de l'Académie royale des sciences, avec les mémoires de Math. et de Physique, Année 1763: Expériences sur la résistance des fluides" par Chevalier de Borda (стр. 358). Этот мемуар заключает описание опытов, произведенных в воздухе при помощи маховика, к которому прикреплялись испытываемые тела.[1] Горизонтальная ось маховика вращалась от действия груза и определялась скорость, лишь только она становилась постоянною, что и дает сопротивление.[2] Робинс в Англии раньше Борда, а именно ранее 1742 г., когда он опубликовал свои New principles of Gunnery, первый применил этот способ определения, но так как он имел лишь надобность для целей артиллерии определить сопротивление шара в воздухе, то его опыты и не были направлены к той цели — проверке теории Ньютона — какую имел Борда и которая делает исследования этого последнего особенно важными в вопросе о сопротивлении среды. В том же мемуаре Борда описывает опыт с кубом (черт. 26), который он двигал прямолинейно в воде при помощи груза, определяющего сопротивления. Борда в 1767 г. (та же история академии за 1767 г., стр. 495) публиковал второй мемуар, где описывает опыты в воде, произведенные при помощи вращающегося маховика, насаженного на вертикальной оси

ваниям опыта, но все же исходные точки Нордмарка таковы, что его выводы имеют лишь относительный, исторический, а не абсолютный интерес.

[1] См. лист 3, чертеж 19.

[2] См. следующую главу, где даются практические результаты и описываются методы опытных исследований.

(черт. 24). Приемы Борда затем служили моделью во всех почти других опытах над сопротивлением воздуха и воды. Ваинс, Хуттон и Бофуа в прошлом столетии, Тибо, Рыкачев, Хаген и др. в нынешнем столетии пользовались для определения сопротивления воздуха приемом Робинса и Борда, т. е. вращающимися маховиками, а для опытов в воде французские академики Бофуа, Нордмарк, Чапман и др. применили такой же прием, как Борда для куба. Так с исследований Борда начинается новый период в учении о сопротивлении среды. Этот второй период имел бы совершенно иное значение, если бы, убедившись в непрочности и неверности, по недостатку твердых основных положений, решения задач путем математического анализа, исследователи того времени постарались прямо из ряда опытных данных извлечь какие-либо общие выводы, могущие служить поводом для дальнейших попыток овладеть предметом. А взамен этого случилось следующее. Опытами показывалась неверность принятого. Его должно было отвергнуть. А его одни старались поправить, другие старались заменить несостоятельные и произвольные гипотезы другими, такими же произвольными, а потому и несостоятельными, третьи же довольствовались числами опыта и дальше итти не желали, не желали никаких обобщений. К числу этих последних принадлежал сам Борда. Он вывел из своих опытов: 1) что сопротивление квадратной пластинки, в 9×9 дюйм., движущейся в направлении своей нормали, при скорости 10.66 фут. в секунду, равно 0.1547 фунт., а по Ньютоновой теории оно должно быть 0.0932; 2) что сопротивление растет быстрее, чем величина плоскости пластинки; 3) что сопротивление шара относится к сопротивлению его большого круга, как 1 : 2.44 в воздухе или как 1 : 2.508 в воде, тогда как теория Ньютона требует отношения 1 : 2;[1] 4) что сопротивление конических тел следует скорее закону первой степени синусов, чем квадрату синусов, как признает теория; 5) что для кривых поверхностей действительное сопротивление менее вычисляемого на основании теории по изменению углов уклона и т. д. Словом, он показал, что во всех пунктах теория Ньютона грешит, но больше ничего не сделал, не поискал какой-либо связи между своими наблюдениями. При таком отношении к предмету является как неизбежное следствие — отсутствие всякой научной критики, основанной на тех или других обобщающих соображениях, которых требует и всякое опытное исследование, как и каждое теоретическое изучение; т. е. Борда не стремился сличать и проверять, разбирать и сопоставлять собственные свои опыты, а брал их, как есть, с полным доверием.

---

[1] И это справедливо только для несплошной жидкости, для такой же сплошной, какою можно считать воду, Ньютонов вывод дает совершенно немыслимое, показывая, что сопротивления шара и цилиндра при одном радиусе равны.

Так—можно счесть единичный опыт, не могущий никогда считаться совершенно достоверным, за решающий дело. Вместо ошибки теоретической, тогда легко впасть в другую, не менее важную — в ошибку опытного данного. В применении к методу исследований Борда это особенно полезно заметить, потому что круговращение сопротивляющихся тел влечет за собою развитие центробежных сил, и было необходимо прямыми исследованиями убедиться в достоинстве чисел, получающихся этим способом, сравнить их с числами, полученными при прямолинейном движении, предполагаемом в теории и наиболее важном для практики. Отсутствие какого-либо положительного вывода из опытов Борда[1] и отсутствие критического отношения к принятому способу исследования, с одной стороны, заставляет несовершенно доверять ни теории, ни опыту, а с другой, усложняет, а не облегчает дело последующих исследований, потому что—на их долю остается вновь проверять теорию, да еще и повторять и объяснять опыты прежних исследователей. Такова уже трудность задачи сопротивления, что даже такой остроумный исследователь, как Борда, не решается в ней делать своих собственных шагов, довольствуясь указанием на то, что шаги других — неверны. Но, конечно, лучше видеть только неверность принятого, чем верить неверному, лучше признавать нерешенным вопрос, чем решать его ложно, хотя истинное движение вперед должно ставить на место отвергаемого что-либо новое — иначе будет возвратное движение знания, а не прогрессивное. Так и понимали вопрос сопротивления другие два французские исследователя конца прошлого столетия, и они имели зато много последователей, вложили в учение о сопротивлении новые элементы, с которыми, во всяком случае, придется ведаться, когда будет вновь строиться учение о сопротивлении среды. Эти два исследователя носят такие же громкие имена, как Борда, Боссю, Кондорсе, д'Аламбер, и также принадлежат к семье знаменитых деятелей французской науки в конце прошлого столетия, это—Кулон (Coulomb) и Дю-Буа (Du Buat).

Изобретатель крутильных весов, принцип которых с тех пор применяется во многих тончайших физических исследованиях, применил изученные им законы кручения проволок к решению следующего вопроса из задач о сопротивлении: зависит ли от скорости и от какой степени ее та часть сопротивления, которая происходит от прилипания, сцепления, липкости и вязкости жидкостей и которая может быть названа трением, т. е. силою,

[1] За такой вывод нельзя считать то заключение, что сопротивление пропорционально квадрату скорости, потому что этот опытный вывод выводится тоже из опытов Ньютона над падением тел в воде и воздухе и, при малой опытной разности скоростей, не имеет силы, достаточной для твердого убеждения в общности начала.

действующею преимущественно на плоскости, параллельные направлению движения, а не на нормальные к нему, испытывающие преимущественно прямое сопротивление, определяемое, по Ньютоновой гипотезе, инерциею жидкости? Вопрос поставлен так прямо и ясно, что одна его постановка есть уже важный шаг во всем учении о сопротивлении. И Ньютон, и Боссю, и все предшественники Кулона, конечно, понимали, что трение играет роль в сопротивлении, но признавали величину трения ничтожною сравнительно с величиною прямого сопротивления, происходящего от инерции. Д'Аламбер, Кондорсе и Боссю в своих исследованиях, уже выше упомянутых, старались убедиться в малости трения. Достаточно упомянуть следующий их вывод из опыта: при удлинении движущейся в воде призмы сопротивление не возрастает, а даже уменьшается. Отчего происходит это уменьшение — это вопрос другой, но, во всяком случае, если бы трение было значительно, оно бы увеличило сопротивление при удлинении призмы. Французские академики заключили из этого, что трение во всяком случае должно быть силою, мало изменяющею сопротивление. Это заключение такое же, как и Ньютона, даже простое повторение его слов. Кулон отрешился от этой части Ньютонова мнения, хотя и находится еще под его влиянием. Видно это из того, что Ньютон все учение о сопротивлении (помещенное во 2-й части его Principia) делит на главы: в первой рассматривает случай пропорциональности первой степени скорости, во второй главе — квадрату скорости, в третьей — их сумме. Кулон признает с Ньютоном, что прямое сопротивление, происходящее от инерции, зависит от квадрата скорости, но признает вместе с тем, что сопротивление выражается суммою двух членов av^2+bv, из которых один есть av^2, зависящий от инерции, а другой есть bv, зависящий от трения.[1] Далее он вводит такое представление, удержавшееся затем во многих, если не во всех сочинениях о сопротивлении: когда скорости v — малы, член bv играет большую роль, его значение преобладает в выражении величины сопротивления, когда же скорости велики, то этот член ничтожно мал пред членом av^2, а потому тогда все сопротивление можно выразить этим одним членом. Это нововведение так просто и так согласно с выводом из его опытов, что невольно удерживается в науке. Впрочем, важнее, чем вышеуказанная, та часть работы

[1] Способ качания маятника в воздухе и в жидкостях, примененный уже для подобной цели Ньютоном, привел его к выражению сопротивления суммою $av^2+bv^{\frac{3}{2}}+cv$. Те же опытные числа Бернулли выразил одною суммою av^2+b, как то принимает Ньютон для случая падения в воде и воздухе, считая, повидимому, трение жидкостей (член b) независящим от скорости. Сгравезанд применил для выражения сопротивления движущегося тела такое же выражение av^2+b, а для того случая, когда движется жидкость, давление на неподвижное тело выразил суммою av^2+bv.

Кулона, где он является экспериментатором и дает прием определения члена bv, зависящего от первой степени скорости и выражающего одно трение без инерции.

В первом ряде своих наблюдений Кулон определял сопротивление цельных (сплошных) горизонтальных кругов, качающихся около своего центра и остающихся при этом в первоначальной своей плоскости. Круглая пластинка, судя по этому, не перемещала частиц среды, т. е. не производила ударов о среду, и не давала повода инерции принять участие в сопротивлении.[1] Однако, сопротивление и в этом случае существует и выражается уменьшением амплитуд колебаний и так называемым логарифмическим декрементом. Задерживающая сила при этом будет, очевидно, не что иное, как трение (тот род его, который ныне называется внутренним трением), зависящее от вязкости и других сил, действующих между скоро двигающимися вслед за кругом частицами жидкости, прилипшей к качающемуся кругу, и остальною массою жидкости, все медленнее и медленнее двигающеюся по мере удаления от круга. Это тот самый прием, каким в новейшее время Максвель, Мейер и др. определяют внутреннее трение воздуха, столь важное как доказательство господствующей механической теории газов, то самое трение, которое служит причиною образования вихревых колец и многих других явлений. Сущность приемов наблюдений очевидна будет из следующего примера. Был взят диск (круг), диаметр его 195 мм. Привешенный за центр к длинной тонкой проволоке (прибор изображен на листе 1, черт. 5), он был погружен в воду (или затем в масло) и, как в крутильных весах, колебался, начиная от 0 до 192° уклона (вся окружность разделена была на 480°). После десяти колебаний (полукачаний или размахов) амплитуда колебания была всего 52°.3. Логарифм 192=2.2833, а log 52.3=1.7185. Разность логарифмов, деленная на 10,=0.0565. Тот же круг, начавший качаться от 0 до 13.°8, после десяти колебаний качался до 3.°3. Логарифмический декремент колебаний почти тот же 0.0571. Время 4 колебаний=97 сек.[2] Когда круг (очень легкий) был снят и качания наблюдались над остальными (тяжелыми) частями прибора, прикрепленными к проволоке, то время 4 колебаний было=91′, а средний декремент 0.0058. Кулон произвел ряд подобных определений с разными дисками в воде и масле и вывел: 1) что липкость или трение, действующее в вышеприведенных опытах, в 17.5 раз больше для масла, чем для воды; 2) что смазанные салом круги качаются в те же времена и представляют ту же

[1] См. лист 1, чертеж 5, где изображен прибор Кулона и где он кратко описан.

[2] Качания здесь, как известно, также подчиняются закону изохронизма, как и в маятнике, а потому время одного колебания почти не зависит от амплитуды.

убыль колебаний, что заставляет признавать трение независящим от поверхности твердого тела, а происходящим от взаимнодействия жидких частиц друг на друга, и 3) что под разными давлениями (в безвоздушном пространстве, около поверхности жидкости и на глубине 50 см под атмосферным давлением) сопротивление, пропорциональное скорости, не изменяется, т. е. глубоко отличается от трения твердых тел, так как последнее не зависит от скорости, а возрастает с давлением.

После того Кулон заставлял в воде и масле колебаться цилиндры разных диаметров и величин. Здесь, кроме того трения, которое действовало в предшествующих опытах, являлось прямое сопротивление, зависящее от квадрата скорости. Тогда уже не получался, как в предшествующих опытах, постоянный декремент и опыты пришлось рассчитывать, приняв для их выражения формулу av^2+bv. Для масла и воды значение множителя b, зависящего от первой степени скорости, получилось по своему отношению то же, как и в опытах с кругами. Коэффициент же a при квадрате скорости вышел для масла почти тот же (а именно, немного менее), как и для воды, что Кулон и объясняет тем, что член av^2 выражает инерцию, а потому и должен представлять для масла и воды то отношение, какое имеют их плотности.

Если бы опыты Кулона относились не к случаю кругового движения, а к прямолинейному, были произведены при постоянной скорости, а не при переменной, как в маятнике,[1] если бы сверх того важнейший его вывод (трение пропорционально 1-й степени скорости) можно было, при современном запасе сведений, помирить с фактами, добытыми другими исследователями (Бофуа и Фроуд показали, что трение зависит от скорости в степени, близкой ко второй), то они бы имели сами по себе громадное практическое значение в вопросе сопротивления среды. Ныне же им нельзя придать другого большого и существенного значения, кроме исторического, потому, главным образом, что при колебаниях скорости в разных частях пути не одинаковы ни для частей качания, ни для разных убывающих по размаху качаний. Такой случай переменных скоростей должен служить поводом к сильному изменению меры всякого сопротивления, подобно тому как трение изменяется при начале движения. Надо думать, что именно по этой причине (непостоянству скоростей) опыты Кулона расходятся со всеми другими позднейшими определениями, касающимися участия трения в сопротивлении. Тем не менее опыты и воззрения Кулона были весьма важны в истории сопротивления среды, потому что с тех пор на трение стали смотреть, как на

[1] Можно сочинить такое расположение прибора, что скорость будет постоянна (вращать диски падающим на шнуре грузом, производя измерения только тогда, когда скорость падения будет постоянна), а потому мне удивительно, что до сих пор такие опыты не воспроизведены.

измеримую долю сопротивления, стали его рассчитывать и дошли до того даже, что им одним старались объяснить все сопротивление в некоторых случаях, как то видим во взглядах Стокса, Ранкина и Фроуда. Значение опытов Кулона еще увеличивается потому, что он первый дал материал и приемы для определения той характеризующей каждую жидкость постоянной величины, которую Стокс, Максвель, Мейер и др. называют ныне внутренним трением. Цитированные опыты Кулона служили Стоксу (1850) исходом для выводов об этом предмете.

Другой исследователь сопротивления среды—Дю-Бюа, так же, как и Кулон, приняв выводы Борда, Боссю и др. о невероятности Ньютоновой теории, пытается опытным способом установить новые начала в учении о сопротивлении. Наблюдатель и вообще исследователь остроумный и усидчивый — Дю-Бюа произвел ряды опытов, относящихся к движению воды и ее сопротивлению, изложенных им в книге, носящей название „Principes d'Hydraulique“.[1] Это действительно начала гидравлики, за которыми следуют все дальнейшие авторы сочинений по этому предмету. Бо́льшая часть второго тома этого сочинения посвящается сопротивлению жидкостей. Вот как, в предисловии, сам Дю-Бюа характеризует свое отношение к вопросу (Discours préliminaires, p. XXVII). „Последняя часть сочинения содержит наш опыт о сопротивлении жидкостей: здесь совершенно новым способом мы рассматриваем в двух отделах сопротивление воды и воздуха, не пользуясь вовсе прежнею теориею, которая оказалась столько раз противоречащею опыту, и стараясь отыскать в опытах, до нас не имевшихся, новые точки зрения на предмет“.

„Нельзя не удивляться тому, что в столь просвещенный век (XVIII) знают так мало о сопротивлении жидкостей и что, пользуясь ежедневно воздухом и водою для движения машин и кораблей, мы не имеем чего-либо одного — или большого запаса опытных данных, если теория оказывается сложнею, или лучшей теории, которая должна быть плодом опытного знания предмета“.

„Мы считаем себя счастливыми уже тем, что нам удалось разложить сопротивление, испытываемое движущимся телом в жидкости, на два различные усилия: одно, действующее как давление на переднюю часть тела, а другое как недостаток давления сзади. Первое постоянно, если величина и форма передней части тела сохраняются. Второе изменяется с длиною тела и всегда уменьшается с возрастанием длины независимо от кормовой формы, которая также влияет на величину заднего недавления (non-pression).

---

[1] У меня под руками 2-е издание этого сочинения (nouvelle édition, revue et considérablement augmentée, как значится на заголовке), явившееся в 1786 г. Очевидно, что опыты Борда вызвали все эти труды французов о сопротивлении.

Сумма этих двух усилий почти пропорциональна квадрату скорости, пока она не превышает 3—4 фут. в секунду для воды и 20—24 фут. для движения в воздухе. За этим пределом недавление возрастает быстрее, чем квадрат скорости, тогда как носовое давление остается ему пропорциональным. Тело испытывает меньшее сопротивление, двигаясь в покоющейся жидкости, чем тогда, когда сопротивляется напору жидкости, движущейся на него. Переднее давление на плоскость, движущуюся в жидкости или принимающую ее удары, неодинаково на всех точках поверхности: оно уменьшается от средины к окружности. Это явление, кажущееся столь странным, есть только следствие основного начала, проявляющегося в сопротивлении, а именно: боковое давление движущейся жидкости всегда равно давлению покойной жидкости без давления, соответствующего высоте, отвечающей скорости, с какою движется жидкость".

„Прямые и хорошо проверенные опыты показали нам зависимость между скоростью и давлением и недавлением, или суммою сопротивления, являющегося при движении тела или жидкости для плоских поверхностей, кубов и призм. Опыты Ньютона дают сопротивления шаров; но новый способ рассмотрения явлений так чужд всякой теории, что неизвестно более таких начал, которые могли бы служить для определения сопротивления наклонной плоскости. Другой род опытов кажется, однако, могущим пролить некоторый свет на такую важную задачу. Всякое тело, движущееся в жидкости, сообщает свое движение такой части самой жидкости, которая изменяется с очертанием и объемом тела: часть жидкости толкается телом перед собою, другая следует за ним сзади. Наибольшее (миделевое) сечение тела, к которому, обыкновенно, относят удар, составляет, повидимому, основание, на которое опираются увлекаемые объемы жидкости. Чем больше эти объемы, тем, повидимому, дальше от наибольшего сечения уклоняется жидкость, тем слабее становится удар. Поэтому, чем больше сумма объемов тела и увлекаемой им жидкости, тем, при равных наибольших сечениях тела, сопротивление меньше. Тонкая пластинка завлекает наименьший объем жидкости и потому представляет и наибольшее сопротивление. Заостренное тело, большей или меньшей длины, для которого тонкая пластинка представляет площадь наибольшего сечения, испытывает тем менее сопротивления, чем больше длина. И то же самое относится ко всяким правильным формам и телам вращения. Если бы каждый раз можно было знать сумму объемов тела и увлекаемой им жидкости, можно было бы знать и отношение сопротивлений, которые обратно пропорциональны объемам. Из нашего сочинения видно, что такое представление согласно с опытами. Заставляя качаться в воде тела различных правильных форм, можно узнать, сколько они увлекают в своем движении жидкости, пользуясь

для этого наблюдениями времен качания при разных длинах маятников. Сверх того должно заметить, что подобные тела представляют сопротивления, пропорциональные квадрату своих соответствующих боковых линий и квадрату скоростей, и что этот закон одинаково справедлив для воды и для воздуха, если тело в них совершенно погружено. Так же можно из опытов над сопротивлением в одной из этих двух жидкостей судить о сопротивлении в другой, пользуясь знанием отношения их плотностей, как мы с точностью доказываем опытами. Все эти исследования дают, по крайней мере, величину прямого сопротивления и указывают путь для разыскания сопротивления косвенного".

„Предшествующее приложимо только к тем обычным скоростям, которые применяются в действительности. Но для таких быстрых движений, каковы, например, движения артиллерийских снарядов, мы показываем, что сопротивления возрастают быстрее, чем квадраты скоростей. Это возрастание ограничивается такою скоростью, когда сзади тела образуется пустота: начиная отсюда, при увеличении скоростей, сопротивление растет медленнее, чем квадраты скорости".

Таковы выводы Дю-Бюа. Нет нужды описывать и перечислять все подробности его наблюдений. Следует только указать главные способы и численные результаты его наблюдений. Но предварительно необходимо обратить внимание на то, как много самостоятельности показал этот исследователь, сумевший отрешиться от господствовавшего представления. Зато он может гордиться тем, что увлек за собою, за своим учением о носовом давлении и кормовом недавлении — множество дальнейших исследователей. Дюшемен, в своем обширном сочинении: „Recherches expérimentales sur les lois de la résistance des fluides" (par M. le Colonel Duchemin, extrait du Mémorial d'Artillerie, t. V, Paris, 1842), переведенном и на немецкий язык, перепечатанном и в Бельгии и цитируемом поныне всегда, когда речь зайдет о выводах учения о сопротивлении — Дюшемен вполне принял учение Дю-Бюа об этом предмете и сделал его популярным. Современник Дю-Бюа — Ромм, в „Записках Парижской академии" (1764) и в сочинении о морском искусстве, переведенном на все почти языки (включая и русский), описывает опыты такого же рода, как у Дю-Бюа, и держится, в сущности (хотя не по форме), тех же начал, как этот последний, доводя свои следствия до крайнего и совершенно ложного положения (основанного на опытах, очевидно, неточных), состоящего в том, что сопротивление корабля зависит только от его миделя, а не от обводов носа и кормы, если последние не представляют очень грубых разностей и отвечают одинаковой длине. Навье, родоначальник современной школы французских инженеров-механиков, в своем общеизвестном сочинении „Résumé

des leçons sur l'application de la mécanique etc." и в других своих исследованиях прямо следует за Дю-Бюа, определяя

$$R = \Delta M (m + n) \frac{v^2}{2g},$$

где m и n — численные, опытные коэффициенты, постоянные для подобных тел, изменяющиеся с переменою обводов и выражающие цифры переднего давления и кормового недавления. Понселе, Буржуа и многие другие французы, в существенных частях изложения, следуют за Навье. Англичане приняли также основную мысль Дю-Бюа и стали делить все сопротивление на кормовое и носовое, что особенно ясно видно в исследованиях Бофуа, о которых нам придется много говорить впоследствии. Бофуа, произведший много новых и важных для дела определений сопротивления, разбирая результаты своих измерений, все сопротивление каждого отдельного тела делит (вычтя трение) на plus and minus pressure, т. е. совершенно так, как Дю-Бюа, хотя методы нахождения этих отдельных слагаемых у них и весьма различны.

Так, от Дю-Бюа ведет начало новое учение о сопротивлении, учение, глубоко отличающееся от Ньютонова и представляющее характерным своим признаком — стремление изойти из опыта для решения задач сопротивления. Одним из важных и резких различий Дю-Бюа от предшественников должно считать выяснение роли кормы, т. е. части, следующей за миделем. Ньютону, Эйлеру и многим другим, бравшимся столь напрасно за теорию сопротивления, — было не ясно то влияние кормы на сопротивление, которое практика мореходного дела делает столь очевидным. Дю-Бюа первый ясно сознал, старался выразить и объяснить и влияние трения, и влияние длины, и много других подробностей учения о сопротивлении. Оттого мне кажется, что этот исследователь есть первый зачинатель правильного решения задач сопротивления. За ним последовали, его мысли подхватили многие, но его силы не было у последователей, они не сумели продолжать новый опытный путь, сбились на более торную дорогу и кончили тем, что сбились с нового пути опять на старый.

Главною особенностью исследований Дю-Бюа служит применение трубки Пито для отыскания законов сопротивления.

Пито (Pitot), почти современник Дю-Бюа, предложил Парижской Академии в 1753 г. для измерения скорости течения рек прибор, носящий с тех пор его имя: трубка Пито. Это простейший и остроумнейший прибор. Трубка, открытая с обоих концов и загнутая под прямым углом, погружается вертикально в реку так, чтобы отверстие горизонтальной ветви было направлено противу течения. Тогда вода поднимается в вертикальной ветви

выше уровня.[1] Высота поднятия воды в трубке Пито пропорциональна квадрату скорости, как и высота, отвечающая скорости при свободном падении.

[1] Для определения уровня Пито присовокупляет другую вертикальную не загнутую трубку — это недостаток первичного устройства, потому что в этой трубке уровень воды ниже обычного уровня (по капиллярности) и наблюдать его неудобно. Видоизменения трубки Пито, предложенные впоследствии для определения скорости течения рек или скорости хода судов, представляют также две трубки, — одна с отверстием, направленным противу течения, другая с отверстием, направленным вниз или взад. В первой, при движении, вода поднимается, во второй опускается. Разность высот служит мерою скорости воды или судна. Чтобы наблюдение было возможно и удобно, обе трубки соединяются вверху, и из них обеих вытягивается часть воздуха. Оттого оба уровня воды в трубках поднимаются до желаемой высоты. Такое приспособление делает прибор удобным для определения скорости хода судов и, по моему предложению, В. П. Верховский и В. А. Купреянов, летом 1879 г., испробовали подобный прибор на одном из миноносных судов. Для этого на носу парохода прикреплялся шест, спускающийся в воду, и к этому шесту прикреплена была круглая цилиндрическая коробка с поперечною перегородкою. Ось цилиндрической коробки направляется горизонтально, по оси парохода. Два дна (переднее и заднее) и перегородка перпендикулярны к направлению пути. В плоском, переднем, круглом дне коробки, обращенном кнаружи, сделано в средине тонкое отверстие. Такое же в заднем дне коробки. Из переднего и заднего отделения коробки идут трубки, доходящие до манометра, или указателя уровней, снабженного насосом для разрежения воздуха. Разность уровней определялась делениями; 20 делений = 510 мм, скорость хода — числом оборотов машины, а ранее было известно отношение числа оборотов к скорости.

Привожу полученные результаты, в средних числах из 40 наблюдений:

Число наблюдений	Число оборотов машины	Средняя величина разностей уровней	Скорость в узлах (в морских милях в час)	Скорость в м в секунду по уравнению $v = 0.025\,n - 0.05$	Разность уровней в м $d = 0.0255\,D$
3	$n = 50$	$D = 4.40$ делений	2.25	$v = 1.20$	$d = 0.112$
5	60	5.25	3.0	1.45	0.134
1	74	7.80	3.5	1.80	0.199
5	75	8.16	—	1.82	0.208
7	85	10.53	—	2.07	0.268
6	100	15.10	4.5	2.45	0.385
7	104	15.96	—	2.55	0.407
6	110	16.30	5.25	2.70	0.416

Принимая формулу $d = k\frac{v^2}{2g}$ или $d = Kv^2$, должно получить для $\frac{d}{v^2}$ постоянную величину $\frac{k}{2g}$ или K. В действительности имеем следующий ряд чисел (для $n = 50$ и 74 мало наблюдений, а потому не приводим результата):

$n =$	60	75	85	104	110
$K =$	0.063	0.063	0.062	0.064	0.057

Среднее $K = 0.062$; а потому $k = K2g = 0.062 \cdot 2 \cdot 9.8 = 1.22$, что близко к обычным числам, получаемым при изучении сопротивления. Надо думать, что

Прибор Пито был применен Дю-Бюа для своих исследований. Им он определял носовое давление и кормовое недавление. Вместо прямого наблюдения вышеописанною трубкою разностей высот близ водяной поверхности, что очень неудобно, Дю-Бюа делал трубку из жести и в нее пускал поплавок с выдающимся стержнем, движущимся при поднятии уровня воды в трубке. Замечая на шкале стояние поплавка как в то время, когда движения (воды или прибора) нет, так и тогда, когда оно происходит, Дю-Бюа судил о высоте поднятия воды в трубке. Приборы, примененные Дю-Бюа, изображены на листе 1, черт. 2, 3 и 4. Первый из них представляет простейшую, первичную форму прибора, употребленную для наблюдений около поверхности воды *ab*. Прибор этот есть деревянный, вверху открытый ящик, видный на черт. 2 спереди, где сделано 9 отверстий, и в разрезе, на котором видно относительное положение шеста *gh*, служащего для укрепления снаряда. В ящике плавает поплавок с выдающимся указателем *n*. Приборы, изображенные на черт. 3 и 4, закрыты со всех сторон и только спереди имеют отверстия, а сбоку имеют особые трубки, вмещающие поплавок. На первом из этих приборов (деревянный ящик) 21 отверстие, а во втором 5 и более. Последний состоял из жестяного ящика с переднею стенкою в 1 кв. фут. Важно заметить, что только

при надлежащем устройстве приборов, при продолжительном изучении дела и при разнообразных возможных улучшениях — прибор, подобный вышеописанному видоизменению трубки Пито, может сделаться практическим орудием мореплавателей, потому что он может показывать (и регистрировать, т. е. записывать) в каждый момент пути скорости хода и сопротивления. Заметим, что сам Пито уже употребил свою трубку для подобной же цели и что затем многие предлагали и применяли подобный же прибор, но никто, сколько мне известно, не занялся окончательною разработкою этого прибора, который можно было бы назвать ходомером. Во всяком случае улучшенная трубка Пито во многих отношениях заслуживает предпочтение пред обыкновенным морским лагом и стоит внимания практических мореходов. Ее видоизменение, приложимое к воздухоплаванию, я предполагаю описать, когда число опытов успею увеличить. Считаю здесь неизлишним указать на то, что применением трубки Пито к определению хода кораблей после самого Пито занимались многие. Укажу например на Berton (Society of Engineers, Trans. for 1869, p. 215); Groshof (Theoretische Maschinenlehre, I, 887), Fletcher a. Reichenbach (Engineering, 1871; Dingler's Annalen, t. 203, p. 329) и Froude (Report of the British Association, 1874, p. 255). Бертон и Фроуд применили вертикальную трубку с боковым отверстием и показали, что, вращая трубку около оси, получается поднятие или опускание, соответствующее углу и скорости. Мне кажется, что необходимо соблюдать в приборе * следующие непременные условия, чтобы он был точным измерителем скоростей: поместить его впереди носа, отверстия делать в центре тонкой круглой пластинки, перпендикулярной килю, одно отверстие направить против течения, другое по течению (обратить к кораблю), оба расположить по направлению киля и наблюдать разность уровней в двух трубках, сообщенных с этими отверстиями. Неуспех попыток, сделанных до сих пор, можно приписать несоблюдению одного из этих условий.

* В подлиннике „приборах". (*Прим. ред.*)

у этого последнего прибора толщина стенок мала, а потому отверстия не представляли трубчатых насадок, как у приборов 3 и 2, где стенки были деревянные, толщиной у 2-го в 1 дюйм, у 3-го в $^1/_4$. При опыте открывались или закрывались желаемые отверстия. С этими немудрыми приборами Дю-Бюа сделал очень мудрые определения, навсегда памятные в науке о сопротивлении, оказавшие на ход ее большое влияние, хотя и довольно одностороннее.

Прежде всего прибор, черт. 2, был помещен в текущую воду, скорость которой определялась особым маховиком с лопатками и была (на глубине центра прибора) = 42.1 дюйма в секунду. Этой скорости отвечает высота (по уравнению $h = \frac{v^2}{2g}$ 2.″ 444).[1] Когда открыто было одно среднее отверстие прибора (фиг. 2), погруженного на $^3/_4$ высоты в воду, в ящике его (опыт № 207) высота воды была 3.″33, когда открыты были только два или одно ближайшие к центру отверстия, поднятие = 2.″42, когда открыто было одно нижнее среднее отверстие 2.″09, одно угловое нижнее 1.″0. Когда открыты были все отверстия, поднятие было = 2.59. Когда взят был прибор, изображенный на черт. 3, и погружен весь в воду (бок прибора 7″, погружение центра 6″), то при открытии всех отверстий (опыт 208) поднятие поплавка было = 2″7$^1/_2$‴, когда открыто только центральное отверстие = = 3″5‴, одно отверстие под центром 3″1‴, одно под этим 2″9‴, одно нижнее среднее 2″3‴, одно сбоку центра 3″4‴, следующее сбоку 3″0‴, одно боковое крайнее 2″6‴, одно над центром 3″3‴, второе над центром 3″0‴, самое верхнее одно 2″7$^1/_2$‴. Из этого следует с очевидностью, что давление на разные части пластинки не одинаково: в центре наибольшее, к бокам уменьшается; в центре = 1.33 h (h высота, отвечающая скорости), а на всей пластинке = 1.06 h. Очевидна также связь этих поднятий с поднятием воды на вертикальной плоскости, поставленной противу течения. Приближенно допускает и Дю-Бюа, что среднее давление на дно поверхности[2] равно давлению столба h, как следует из опытов д'Аламбера, Кондорсе и Боссю (стр. 313). Далее он говорит преимущественно о явлениях, замечаемых при полном погружении в воду вышеописанных видоизменений трубки Пито. Следующий ряд опытов сделан в канале 13′ ширины и 3′9″ глубины; Дю-Бюа рассматривает его по отношению к прибору (поверхность 1 кв. фут) как бесконечную[3] массу воды, хотя

[1] 1 французский дюйм 1″ = 27.07 мм = $^1/_{12}$ франц. фут. = 12 франц. линий.

[2] В подлиннике „поверхность". (*Прим. ред.*)

[3] Так как по моим личным опытам и по совокупности известных мне других наблюдений должно думать, что сопротивление заметно растет даже тогда, когда диаметр канала в 5 раз превышает диаметр тела (здесь глубина в 4 раза), то в узкости канала, примененного Дю-Бюа, должно искать причину неточности некоторых выводов Дю-Бюа.

прибор погружался так, что центр был на глубине 15″. Все результаты переведены к скорости течения 36″ в секунду. Этой скорости отвечает высота $h=21.5$ линий. В дело пошел жестяной прибор, изображенный на черт. 4. У него 5 отверстий: *I* в центре, *II* на $^1/_4$ расстояния от вертикального бока, на средине высоты, *III* близ края, на той же горизонтальной линии средины, всего на 10‴ от края, *IV* у самого края на той же линии и *V* в самом углу, внизу. Все отверстия имели около 1‴ диаметра. В опыте 209 был взят один прибор сам по себе, в опыте 210 он составлял переднюю стенку куба; а в 211-м переднюю стенку призмы длиною в 3′. Возвышение воды в трубке было следующее — в линиях (знак минус перед цифрами означает понижение уровня):

Открыты отверстия:	*I*	*II*	*III*	*IV*	*V*	Все
Опыт 209	32.8	27.8	20.8	—5.5	—8.6	17.0
„ 210	32.8	30.2	17.8	—12.1	—	14.3
„ 211	—	—	—	—	—	16.0

Тут видно, что около краев давление настолько уменьшается, что даже становится отрицательным, а в центре оно в два раза больше, чем на всю поверхность. Чтобы объяснить эти отношения, Дю-Бюа рассуждает так: удар воды на все части поверхности был бы один и тот же, если бы вода могла тотчас уходить, исчезать, но она должна уклониться, протечь по поверхности, и скорость течения к краям будет увеличиваться; это течение в бок, вдоль по поверхности, само по себе уменьшает давление, а потому в разных точках поверхности будет наблюдаться алгебраическая сумма (арифметическая разность) давлений: того положительного, которое зависит от текущей в реке воды, и того отрицательного, которое происходит от тока, параллельного (или наклонного) поверхности. Последняя величина близ краев оказывается превосходящею первую, а потому в результате получается около края отрицательное давление.[1] Эти соображения объясняют, может быть, также и то различие, которое видно в 3-х предыдущих опытах, потому что скорости утекания воды с передней поверхности и вдоль ее должны зависеть не только от давления протекающей воды, но также и от того, куда утекает вода и какие препятствия она встречает своему дальнейшему движению. Однако Дю-Бюа считает различия, полученные в опытах 209, 210 и 211, только от неточности способов

[1] Не должно смешивать, как это, может быть, делал даже сам Дю-Бюа, гидростатического давления с гидродинамическим или с напором. Статическое давление остается то же или почти то же при движении, как и до него. Иначе из отверстия под водой близ кормы сосало бы воду, а она в действительности туда вливается.

наблюдения (§ 454), как можно думать по следующему опыту (№ 212). Чтобы узнать все давление, испытываемое прибором, сделано было на одном приборе 81, на другом 625 отверстий (сумма их $= {}^1/_{50}$ всей поверхности). При этом последнем получилось поднятие 28.‴3, когда взят куб 29.‴2, а для призмы 28.‴4. Когда взят прибор с 81 отверстиями 30.‴8. Для трубки Пито, кончающейся воронкою, поднятие=30.‴1, а когда отверстие воронки закрыто диафрагмою с одним отверстием 34.‴4.

Из предыдущих опытов однако нельзя судить о всем сопротивлении поверхности приборов, потому что у краев давление отрицательно, и истинное среднее из суммы всех элементарных давлений должно быть меньше наблюденного, потому что у самых краев не было отверстий. Дю-Бюа рассчитывает, что все среднее давление у него было 25.‴5, а так как высота, отвечающая скорости, =21.‴5, то для передней плоскости должно признать нормальное сопротивление равным весу столба жидкости, которому плоскость служит основанием, а высота $= \frac{25.5}{21.5}\ h = 1.186\ h$, где h есть высота, отвечающая скорости. Следовательно передняя нормальная плоская поверхность представляет сопротивление $= 1.186\ \frac{v^2}{2g}$. Но это переднее носовое сопротивление или давление составляет только часть полного сопротивления, в котором участвует еще заднее кормовое сопротивление, как бы толкающее тело назад вследствие недостатка там давления и выражающееся в том разрежении или уменьшении давления, которое замечается, когда трубку Пито или ей соответствующие приборы Дю-Бюа повернуть отверстиями по течению, а не против него, как было выше. Тогда замечается опускание поплавка, служащее мерою недавления. Оно изучается Дю-Бюа теми же способами, как и переднее давление. Мы не считаем нужным описывать все опыты (от 217 до 222), сюда относящиеся, а прямо приводим выводы, сделанные Дю-Бюа: 1) с длиною тела значительно уменьшается кормовое недавление (у прибора 4-го с 5 отверстиями открытыми = 15.‴0, у куба 6.‴0, у призмы 1.‴12); 2) оно незначительно уменьшается от периферии задней плоскости к центру; 3) оно в своей средней величине одинаково (как и переднее давление) для больших и малых плоскостей и следовательно сопротивление, от него зависящее, пропорционально поверхности; 4) если h есть высота, отвечающая скорости, то для пластинки недавление $= 0.670\ h$, для куба $0.271\ h$, для призмы $0.153\ h$, вообще kh, где k зависит от относительной длины тела.

Из совокупности предыдущих опытов, считая средние показания трубки Пито за истинные мерители давления, испытываемого телом, прямо противопоставленным течению, следует, что

1) плоскость, 2) куб и 3) призма, длиною превышающая в 3 раза ее поперечные размеры, испытывают следующую сумму давлений:

$$\left.\begin{array}{llll} 1) \text{ спереди } \Delta\ 1.186\ hS + & \text{сзади } \Delta\ 0.670\ hS = 1.856 \\ 2) \quad " \quad \Delta\ 1.186\ hS + & " \quad \Delta\ 0.271\ hS = 1.457 \\ 3) \quad " \quad \Delta\ 1.186\ hS + & " \quad \Delta\ 0.153\ hS = 1.239 \end{array}\right\} \frac{v^2}{2g} = S\Delta^1$$

Выражая в килограммах и метрах ($g=9.82$) для плоскости, которой поверхность$=S$, в жидкости, коей 1 куб. м весит Δ, при скорости v м, давление:

$$P = \frac{1.856}{2 \cdot 9.82} \Delta S v^2 = 0.0945\, \Delta S v^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (A)$$

Например для воды, при скорости$=1$ м, площадь в 1 кв. м испытывает напор 94.5 кг. Следствие подобного рода должно было проверить опытом. И это легко было сделать, употребляя в дело весы или динамометр. Дю-Бюа, приступая к подобному весовому определению целого сопротивления, однако оговаривается насчет того, например, что в целом сопротивлении участвует трение[2] и т. п. причины, могущие делать его величиною иною, чем вышеопределенная. Взяты были: I — пластинка поверхностью$=1$ кв. фут.; II — куб, сторона 12″; III — призма, основание 1 кв. фут, длина 3′ и IV — такая же призма длиною 6′; каждое из этих тел прикреплялось к вертикальной ветви весов, имеющих форму буквы T и вращающихся в месте соединения горизонтальной и вертикальной ветвей. На горизонтальном плече прикреплена чашка, и так как длина этого плеча в два раза менее, чем нисходящего, то давление было в два раза менее груза чашки, уравновешивающего напор течения на прикрепленное тело. Погружение то же, как выше, и скорости те же. Полученные сопротивления: I 19.45 фунт.; II 15.22; III 13.87 и IV 14.27 фунт. По вышеприведенным же формулам следует: I 19.34; II 15.24; III 13.96, а для длинной призмы Дю-Бюа рассчитывает IV$=13.49$. Из этого видно, что сумма переднего и заднего давлений исчерпывает почти все давление для коротких тел, а для длинного IV-го тела получается перевес $14.27 - 13.69 = 0.78$ фунт., который объясняется трением и т. п. Итак, здесь ясно, что прием, пред-

---

[1] Для франц. фунтов и футов $\Delta = 70$, для скорости, бывшей в опытах, $h = \frac{v^2}{2g^*} = 21''.5 = 0.149$ фут. Поверхность S в частном случае большинства опытов Дю-Бюа$=1$ кв. футу.

[2] Чрезвычайно интересно, что Дю-Бюа, говоря о трении, прямо предлагает заимствовать величину его из опытов течения воды в трубках и от скорости рек, что именно сделали потом. Сверх того он (§ 481) считает, что трение не успевает вполне проявиться на коротком теле и только при установившемся режиме, т. е. для длинного тела, приобретает истинную свою величину. Это прямо противоположно тому, что предполагает Фроуд (см. 6-е приложение).

* В подлиннике опечатка „29" вместо „$2g$". (*Прим. ред.*)

ложенный Дю-Бюа, дает действительно меру сопротивления. Мы в дальнейшем изложении (в 3-й главе) сопоставим с этими другие прямые определения сопротивлений, теперь же обратим внимание на то, что приём Дю-Бюа нов и изящен; он годится для прямой плоскости, неприменим к кривым поверхностям и что в предыдущем дело касается неподвижного тела и движущейся среды, а не того обычного случая — движущегося тела, который составляет главный предмет учения о сопротивлении. Это видит ясно Дю-Бюа и в следующей главе (V) переходит к определению сопротивления движущегося тела в неподвижной воде. До него никто не сомневался в том, что вышерассмотренное давление равно этому сопротивлению. Он пожелал проверить это положение опытным путем, задавшись (§ 471) вопросом: „не представляет ли спокойная вода сравнительно с движущеюся бо́льшей легкости раздвигания ее частей и следовательно меньшего сопротивления?" Ответ потребовался от природы при посредстве тех же видоизменений трубки Пито, как и в предшествующих опытах. Для этого, около Конде, на запруде течения реки (la Haine) (6′ глубины) опытные бурлаки, идя по обоим берегам, тянули с равномерною скоростью две скрепленные между собою лодки, между ними помост фут. 6 длины, над водой 1 фут, на том помосте прикреплен, на железной полосе, опущенный в воду, вышеописанный прибор (черт. 4). На том приборе было или 2 отверстия (одно в центре, другое совершенно у края), или 625 отверстий. Обращался он отверстиями или в ту сторону, куда тянули, или в обратную. Получались, конечно, возвышения или понижения поплавка. Наблюдалась скорость. Она изменялась от 25 до 67 дюйм. в секунду. Приводим под знаком $\frac{H}{h}$ средние отношения наблюдаемых высот к высотам, соответствующим скоростям:

Скорость от 34 до 37″; спереди $\frac{H}{h}$ 1.09, сзади $\frac{H}{h}$ =0.48	для одного среднего отверстия
„ „ 48 „ 54 „ 1.05 „ 0.57	
„ „ 40 „ 59 „ 0.32 „ 0.48	для крайнего
„ „ 25 „ 41 „ 1.06 „ 0.41	для 625 отверстий
„ „ 49 „ 52 „ 1.01 „ 0.47	

Выводы Дю-Бюа из предыдущих опытов (от 223 до 257 опыта) суть:

1) Давление здесь убывает от центра к окружности медленнее, чем при давлении жидкости на неподвижное тело. У переднего края нет здесь отрицательного давления, как там. Следовательно здесь вода уходит с краев с меньшею скоростью, чем там, или равномернее.

2) Здесь $\frac{H}{h}$ не постоянно, — изменяется со скоростью. Надо искать в вязкости жидкости причину отступления от закона пропорциональности сопротивлений квадрату скоростей. Надо думать, однако, что при скорости выше 4′ пропорциональность эта существует.

3) Поправляя (на недостаток отверстий у краев) наблюденные при многих отверстиях отношения $\frac{H}{h}$ для давления спереди, можно видеть, что оно приближается к 1.00 вместо 1.186, как при неподвижном теле. Эта разность определяет различие сопротивлений в случае подвижного тела — от случая подвижной среды.

4) Величина $\frac{H}{h}$ для заднего недавления увеличивается со скоростью и повидимому не стремится к постоянству, так что вся сумма сопротивления меняется со скоростью. При скорости 36″ заднее недавление надо принять для пластинки равным 0.433 h, а потому для движущейся пластинки сопротивление будет $R = \Delta Sh\ (1+0.433) = \Delta Sh\ 1.433$ вместо $\Delta Sh\ 1.856$, как для неподвижной пластинки в струе воды.

Приведенные числа и выводы интересны по их новизне, но видно, как мало прочности в окончательных заключениях, касающихся движущегося тела. Для этого случая нет у Дю-Буа и прямых (весовых) определений всего сопротивления, он довольствуется цитированием двух опытов Боссю и Борда. Видно, что эта часть работы Дю-Буа слабее всех других. А она, с ее результатами, главным образом и влияла исторически. Такова уже судьба сопротивления. Мне кажется, что даже основное положение о различии двух сопротивлений (движется вода и движется тело) недостаточно подкреплено вышеописанными опытами Дю-Буа, а потому продолжает с тех пор и поныне оставаться сомнительным. Новых же полных опытов в этом отношении никто не предпринимал, хотя легко сочинить обещающие точность.[1]

---

[1] Надо взять весы с вертикальною ветвью и, прикрепив на ней тело, напр. щар, двигать их с разными скоростями, а затем то же сделать в потоке, опять при разных скоростях. Уравновешивающий груз даст сопротивление. Динамометром можно еще удобнее выполнить ту же задачу. Только поток надо взять большой и двигать надо в среде обширных размеров (а не в каналах, как то в обычае старых исследований, дающих иногда действительно канальские различия результатов) и при полном погружении. В воздухе это легче исполнимо, чем в воде, и я предполагаю это выполнить. Условие беспредельности или обширности среды не выполнено у Дю-Буа и, быть может, от него зависят замеченные им разности двух родов сопротивления. С своей стороны я не вижу однако ничего невозможного в выводе Дю-Буа (только он кажется мне нетвердым на своих опытных опорах), потому что тело, двигающееся в неподвижной жидкости, дает повод к движению около него жидкости (на что и расходуется

В следующей главе Дю-Бюа описывает свои опыты (от 262 до 323) с маятным качанием разных тел в воде. Вот повод к их производству: когда ток воды встречает плоскость, он ее обтекает, оставляя около плоскости как бы род водяного носа и водяной кормы, которых скорость меньше, чем в остальной жидкости.[1] Подобное произойдет и при движении тела в жидкости, а чтобы судить о массе сопутствующей жидкости, надо наблюдать колебания маятников. Далее я привожу подлинные слова Дю-Бюа: „Разные массы, прикрепленные к маятникам одной длины, будут колебаться в равные времена и колебания при малых амплитудах изохронны. Времена колебаний будут обратно пропорциональны квадратным корням из длины маятников. Но если два маятника будут качаться при различном напряжении тяжести, то для равенства времен колебания нужно, чтобы длины относились, как тяжести. Тело, удаленное на такое расстояние от земли, что там напряжение тяжести уменьшается на $^1/_3$, будет там иметь только $^2/_3$ того веса, что на земной поверхности. Но если тело, оставшись на земле, будет иметь такую плотность,[2] что погруженное в воду теряет $^1/_3$ своего веса, оно будет тогда в таких же условиях, как при сказанном удалении от земли, потому что при той же массе оно будет иметь только $^2/_3$ своего начального веса. Отсюда следует, что для него тогда надо сократить на $^1/_3$ длину маятника сравнительно с длиною в пустоте, чтобы сохранить те же времена колебаний. Если a длина маятника в пустоте, l длина синхронического маятника в жидкости, p вес тела маятника в жидкости, P вес вытесненной жидкости, $P+p$ вес в пустоте, то $\frac{P+p}{p}$ будет отношение весов в пустоте и воде, а потому $\frac{a}{l}=\frac{P+p}{p}$, откуда $l=\frac{ap}{P+p}$".

„Эта формула дала бы точно длину маятника, если бы тело не увлекло с собой части жидкости в виде жидкого носа и

работа сопротивления), к движению иного рода, чем то, которое расходуется в жидкости, обтекающей препятствие. Здесь скорости жидкости уменьшаются, рождающееся от их потери тепло происходит от той же жидкости, которой передается. Там скорости жидкости образуются и прекращаются, потеря скорости происходит в теле, оно теряет энергию, а образующееся от него тепло передается жидкости. Процессы сходны, но не тождественны, и ум найдет оправдание и тогда, когда сопротивление в обоих случаях выйдет по опытам одно и то же, как и в том случае, когда оно выйдет различным, как у Дю-Бюа. Нужен, настоятелен и будет решать дело — разумный и твердый опыт, а молодое и неопытное умственное построение пойдет на поводу и в ту и в другую сторону, пока приученное опытом к верной дороге само не станет возить за собой или на себе всю сущность опытного знания, как обученная на поводу лошадь повезет, куда следует.

[1] Это слова Дю-Бюа. Не умею помирить этого с тем, что было сказано им же выше о скорости движения вдоль плоскости, а излагаю мысль Дю-Бюа, стараясь быть близким к подлиннику, при всевозможной краткости.

[2] В подлиннике „плоскость". (*Прим. ред.*)

кормы. Пусть n есть постоянное число и nP выражает вес вытесненной и увлеченной жидкости; движущаяся масса, или вес в пустоте, не будет уже $p+P$, а выразится чрез $p+nP$, вес же в воде есть p. Следовательно точное выражение будет:

$$l = \frac{ap}{nP + p},$$

откуда

$$n = \frac{p}{P}\left(\frac{a}{l} - 1\right).$$

Эту величину n Дю-Бюа и определяет. При этом предполагается, что сопротивление среды, уменьшая амплитуду колебаний (влияя на декремент качаний), не изменяет их времен. Для опытов Дю-Бюа берет сперва шары разного диаметра и плотности, заставляет их качаться на тонкой нити разной длины в сосуде с водою размерами $51 \times 17 \times 14$ дюйм. Напр. взят свинцовый шар, диаметром 1″.0113, вес в воздухе 2304 гран (1 куб. дюйм воды весит[1] $337^1/_2$ гран), вес в воде 2102 гран, при длине маятника, качающегося в воде, равной 8.02, 32.08, 128.12 и 286.88 дюйм., оказались времена качаний 0.5, 1, 2 и 3 сек., а по напряжению тяжести следует, что длина соответственных маятников в пустоте (величина a) была бы 9.178, 36.714, 146.856 и 330.427 дюйм. Отсюда выводятся $n = 1.502$, 1.502, 1.522 и 1.620. Так, для стеклянных и деревянных шаров получилось n от 1.3 до 1.67, а в среднем около $n = 1.5$. Заметим при этом, что Пуассон теоретически вывел именно такое число для всяких шаров, но определения Бесселя и Бейли показывают, что величина эта изменяется с диаметром шара. Все это сведено в 1850 г. Стоксом в его замечательном мемуаре о внутреннем трении, помещенном в мемуарах Кембриджского общества (том IX).[2] То что Дю-Бюа считает зависящим лишь от массы спутной воды, то оказывается происходящим и объясняемым внутренним трением. Надо не забыть однако, что это внутреннее трение требует именно того, чтобы допустить движение вместе с телами части приставшей к нему жидкости. Далее Дю-Бюа производит большой ряд наблюдений над качанием в воде площадок, цилиндров, призм, кубов и т. п. тел. Нить, на которой они качаются, разделяется близ тела на две ветви, движущиеся между двумя горизонтально натянутыми проволоками, определяющими плоскость качания. Для призм и цилиндров, качающихся по направлению оси, при

[1] В подлиннике „весом". (*Прим. ред.*)

[2] G. G. Stokes. On the Effect of the Internal Friction on the Motion of Pendulum. (Transactions of the Cambridge Philosophical Society, т. IX, ч. II, 1851, стр. 8). Это редкое издание я имел случай получить только в последнее время благодаря тому, что оно оказалось в библиотеке Пулковской Обсерватории.

разной длине l и разной площади основания S, вполне хорошо применяется выражение $n = \frac{0.705}{l} S + 1.13$. Отсюда, напр. для куба, у которого $S = l^2$, получается $n = 1.835$, а получено, напр. для куба, у которого бок $= 2.177$, вес в воздухе $P + p = 13\,716$ гранов, в воде $p = 9864$, вес вытесненной воды $= 3852$ грана, время качания $1.''3137$, длина соответственного маятника [1] в пустоте 62.397 дюйм., наблюденная длина при качании куба в воде $36.''714$, значение $n = 1.8333$, а так как $(n = 1)$ P есть вес сопровождающей воды, то он здесь $= 3210$ гранов. Точно так же для свинцовой круглой площадки, у которой диаметр $= 2.677$ дюйм., а толщина $= 1.10 = l$, вычисленное значение $n = 19.40$, из наблюдений 19.42. Я не сомневаюсь, что наблюдения Дю-Бюа будут еще многократно обсуждаться и повторяться в науке о сопротивлении, но сам избегаю здесь и в дальнейшем изложении останавливать долго внимание читателей на вопросах, касающихся сопротивлений, являющихся при качательном (маятном) движении, потому что в этом случае скорости неравномерны, а если при постоянных скоростях задача сопротивления сложна, здесь уже и подавно. Не должно однако забывать, что наблюдения над маятниками могут доставить незаменимый материал, потому что прямые наблюдения просты, и результаты легко могут быть доведены до всякой желаемой точности, потому что дело это изучено с крайнею степенью тщательности и полноты трудами Борда, Бесселя, Бейли и многих других. Придет время, когда за решением тонких и численных вопросов сопротивления опять обратятся к маятникам, а ныне должно сосредоточить внимание на сопротивлениях, являющихся при равномерном движении, пользуясь разве маятниками, так сказать, только в качественном отношении, подобно тому, как ими воспользовался Кулон для изучения трения.

Переходя к телам, ограниченным наклонными и кривыми плоскостями, Дю-Бюа следующим способом объясняет меньшее сопротивление их сравнительно с телами (призмами и цилиндрами), кончающимися нормальною к пути плоскостью. Он говорит: „первая причина, уменьшающая сопротивление, есть увеличение скорости жидкости, текущей вдоль наклонной плоскости, сравнительно с нормальною; [2] уменьшение это должно возрастать с наклонностью площади, а от того и переднее давление (носовое) тогда должно уменьшаться. Другая, может быть, более важная причина состоит в том, что прибавка носовой части к плоской нормальной поверхности тела должна заставлять пе-

[1] В подлиннике „маятникам" вместо „маятника в". (*Прим. ред.*)

[2] Мы видели выше (за несколько страниц), что этой скорости течения вдоль плоскости Дю-Бюа приписывает уменьшение давления от центра к периферии и ею объясняет отрицательное давление около края.

редовые струи жидкости уклоняться далее от тела и сохранять чрез то большую часть своей начальной скорости, отчего сопротивление тела должно уменьшаться." Эта выписка (§ 514) мне кажется отлично выражающею достоинства и недостатки мыслей Дю-Бюа о сопротивлении и ту связь, которую имеют взгляды этого исследователя с последующим развитием учения о сопротивлении. Надо заметить, что понятие о давлении обтекающих струй для объяснения сопротивления первый ввел, если не ошибаюсь, Эйлер в средине прошлого столетия, но ни к чему не пришел.[1] Действие и влияние кормы на меру всего сопротивления Дю-Бюа объясняет точно так же, как и влияние носовых насадок, потому что масса завлекаемой телом жидкости увеличивается с носа и кормы одинаково и влияет на уменьшение сопротивления по мере уклона поверхностей, ограничивающих переднюю и заднюю части тела. Дю-Бюа склонен считать сопротивление обратно пропорциональным массе жидкости, увлекаемой телом. Сравнивая, напр., количество жидкости, увлекаемой шаром и круглой пластинкой того же радиуса, получается отношение 2.86 : 1. Опыт Борда дает отношение сопротивления 2.51 : 1. А так как выше мы видели, что сопротивление пластинки, движущейся в жидкости, по Дю-Бюа, определяется выражением ΔSh 1.433, то сопротивление шара будет в 2.86 раз меньше или $= \Delta Sh$ 0.50, где под S подразумевается площадь большого круга или $^1/_4$ поверхности шара. Разобрав опыты Ньютона над падением шаров в воде (см. следующую главу), Дю-Бюа находит, что они дают сопротивление шара ΔSh 0.523, т. е. утверждают его вывод.

Этим кончается исследование Дю-Бюа, касающееся воды. Далее он говорит о сопротивлении воздуха, но этот отдел, менее оригинальный, мы не станем рассматривать с такою подробностью, как предшествующий, напомнив, что все главные выводы и существо мнений выражены им самим в вышеприведенном (стр. 297—299) извлечении из предисловия. Но нельзя не обратить внимание на первоначальный опыт Дю-Бюа, сделанный им для доказательства существования массы воздуха, увлекаемой маятником в своем движении. Сделан был шар диаметром немного более 2 фут., привешен на проволоке и качался, как маятник. Против него, на той же высоте, на расстоянии, доходившем до 4 фут., привешивалось на тонком волоске легкое перышко. Оно качалось изохронно, в те же времена, как и шар, было как бы прикреплено к шару, только амплитуды качаний были меньше, чем дальше удалялось перышко от шара. Это явление Дю-Бюа объясняет сопутствующею, качающеюся вместе с маятником массою воздуха. Руководясь опытами, сделанными над плавающими

[1] См. 3-е приложение, где изложены взгляды Эйлера.

телами, и особенно тем, что шарики, имеющие плотность воды, не увлекаются проходящим около них телом, должно придать опыту Дю-Бюа иной смысл, причину явления искать в вязкости или липкости (внутреннем трении), свойственной каждому телу и даже воздуху. Но не в объяснении дело. И то, которое дает Дю-Бюа, и то, которое можно дать чрез сто лет после него, в наше время, не составляют полного, теоретического, анализированного толкования, а потому пока и несущественны; различия ограничиваются, можно сказать, разностью способов выражения. Дело в попытке — узнать явление в опыте, да в том, что оригинальный опыт учит пониманию явления больше многих трудных измерений, больше целых сложных трактатов.[1] Главное содержание статей Дю-Бюа о сопротивлении воздуха сводится на расчеты относительных сопротивлений воздуха и воды. Приводятся опыты с качаниями легких шарообразных маятников в воздухе, но при этом наблюдается не только время качаний, но и убыль амплитуды качаний. Затем сравниваются для шаров, движущихся в воздухе (опыт Ньютона, Робинса и Борда), найденные сопротивления с теми, какие выводятся для воды, и оказывается, что отношение сопротивлений согласуется с отношением плотностей. А чтобы знать это последнее, Дю-Бюа 27 сентября 1785 г. взвесил оловянный шар пустой, наполненный водою и наполненный воздухом. Барометр показывал 28″3‴, шар, наполненный воздухом при 10° Р., весил в воде 159.5 гран. Часть воздуха была выкачана насосом, и вновь при запертом кране в воде при 10° вес был 42.5 гран. Чтобы узнать, сколько было выкачано воздуха, кран был открыт под водою, и количество вошедшей воды оказалось равным 262.416 куб. дюйм. Следовательно этот объем воздуха весит 117 гран, отсюда при 10° и 28″3‴ воздух в 837 раз легче воды. Ныне мы знаем, что при 10° Р. = 12°5 Ц. и при 28″3‴ (считая ртуть при 10° Р.) = 764.7 мм, при 12°5. = 763.1 при 0°, отношение весов воды и воздуха = = 99.5 : 1.238, считая в воздухе $^2/_3$ влажности, т. е. отношение = = 1 : 807. Следовательно, один, сравнительно грубый, опыт Дю-Бюа дал ему вес воздуха с погрешностью не более 4%, что должно считать весьма удовлетворительным для того времени, когда измерительные средства были вообще мало выработаны и общераспространенные сведения о весе воздуха гораздо менее этого точными (принималось чаще всего отношение 1 : 850 для 10° Р.). Приведенное показывает, что Дю-Бюа должно причислить к наблюдателям чрезвычайно точным, и его числам потому должно доверять в значительной мере. Не должно, однако,

[1] Стокс, в вышеупомянутом сочинении, описывает виденный им опыт подобного же рода, когда кусочек листового золота, прикрепленного к маятнику, не сгибаясь, колебался вместе с ним.

забывать, что у Дю-Бюа нет или почти нет чисел, прямо относящихся к сопротивлению жидкостей. У него много данных для определения влияния среды на качания маятников. В явлении качания маятников участвует сопротивление, но как, на сколько — это остается неизвестным после чтения исследований Дю-Бюа; да и сам он это влияние объясняет спутною жидкостью, не давая возможности увериться в той связи, которая существует между ее количеством и мерою сопротивления. Далее у Дю-Бюа много наблюдений над мерою давления в трубке Пито при разных скоростях и положениях отверстия, но нет убеждающих фактов, относящихся до связи этих наблюдений с сопротивлением движущегося тела. Мне представляется это дело в следующем виде: тот напор твердого тела на жидкость, который рождает сопротивление, производит также и поднятие жидкости в трубке Пито; оба явления идут от одной причины, находятся в связи, но далеко не одно и то же: вода в трубке Пито или в приборах Дю-Бюа остается неподвижною, а около сопротивляющегося тела непрерывно меняется; высота воды в трубке Пито, рассматриваемой как манометр, указывает меру давления, как манометр около трубки водопровода, но она указывает состояние местное, меряет часть явления, вопрос же сопротивления касается чего-то целого, происходящего из суммы множества влияний. Дю-Бюа тем и силен, что он сложное разбил на части, сумел выделить долю, и притом крупную, из всей искомой суммы, указал влияние этой доли на целое, но все же это не целое и все же трубка Пито, как понимает сам Дю-Бюа, бессильна для решения вопроса о сопротивлении косых, изогнутых и вообще всяких других кроме нормальных плоскостей, а именно такими сложными поверхностями и ограничиваются корабли и всякие другие движущиеся предметы, меру сопротивления которых должно вывести из учения о сопротивлении жидкостей. Дю-Бюа, очевидно, только предвестник того, что должно ждать для знания сопротивления от опытного приема его изучения.

Когда во Франции Борда, Боссю, Кулон и Дю-Бюа освежали почву после ньютоновского неурожая, в Англии тоже работали над вопросом сопротивления, и работы прошлого столетия, до начала нынешнего, и там отличались здоровым и опытным направлением, не впали в те две крайности, которые губили и губят успехи многих областей опытных знаний. Одна крайность — рьяное желание охватить умом и анализом то, чего не знают еще почти нисколько. Эта крайность теперь уже не соблазняла никого, потому что Ньютон оказался неверным, Эйлер же и д'Аламбер пытались поправить—тоже не смогли и отказались. И никто не решался соперничать с ними в силе чистого анализа, приложенного к решению задач сопротивления. После того только, как скопился уже запас данных, в самое последнее время

явились попытки этого рода. Они доказывают потребность ума в полной теории явления, но успех дела и ныне нельзя считать ни полным, ни даже удовлетворительным. Крайний, хотя бы и ранний, теоретизм дает по крайней мере толчок и удовлетворение, хотя временное, ему нельзя отказать ни в силе, ни в симпатии. Мне кажется гораздо более вредною другая крайность — чисто практическая. Нужно знать сопротивление артиллерийских снарядов да кораблей. Их измеряют, к полученным числам или подбирают формулу, или прилаживают некоторые соображения, или делают то и другое и считают это теориею предмета, не заботясь о том, чтобы связать новые практические порядки с известными уже фактами, с укрепившимися представлениями. Годно для существующей практики — вот все, чего хотят и чем удовлетворяются. Делается это будто и практично, но для практики вовсе негодно, потому что прилажено к прошлому, недостаточно для будущего, есть покорность факту, а не обладание им, орудие надобности, но не власть знания. В скромной, но важнейшей роли собирателей материала, необходимого для науки, вовсе нет этой претензии — объять одним рядом наблюдений всю сущность дела. Такая — практическая — крайность теперь, в наше время, владеет вопросом сопротивления. Но есть чистое знание, плод пытливости ума, берущего материал отовсюду — и из живой практики, и из чистого абстракта, полученного как плод добытых уже знаний, и из случайных наблюдений, и, главное, из измерений, хорошо анализированных по их мере точности, да из опытов, направленных на проверку той или другой гипотезы, зарождающейся при некотором знакомстве с предметом. Этим путем идет истинное знание и доходит до обладания, до полной теории, до указания практике, до предсказания фактов, не виденных, но узнаваемых. Вот этот-то путь и расчищали Борда, Боссю, Кулон и Дю-Бюа. На нем же стояли англичане прошлого столетия: Робинс, Ваинс, Хуттон, Бофуа. Не вдаваясь в абстракт, не спеша прямо дать практике облик теоретического оправдания, они просто исследовали сопротивление, изучали его меру и тем послужили и для теоретиков и для практиков. Их числа живут и теперь, их надо знать, и во второй главе мы их подробно разберем. У трех первых только и есть в исследовании, что собрание численных данных, касающихся сопротивления тел разных очертаний (результат: числа и понятия о неверности ньютоновой гипотезы), но у Бофуа, кроме огромного запаса данных этого же рода, есть большая новинка — определение величины трения. Так как этому предмету ни Ньютон, ни Дю-Бюа, а за ними и никто другой, не придавали почти никакого значения (хотя о трении упоминали), так как затем, после Кулона и Бофуа, трение стало играть все бо́льшую и бо́льшую роль в учении о сопротивлении и так как даже в наше время ни на что нельзя

сослаться по отношению к определению величины сопротивления, идущего на трение, как на Бофуа да Фроуда, следовавшего по пути Бофуа, то я считаю необходимым подробнее здесь остановиться на данных, касающихся трения как элемента, несомненно участвующего в сопротивлении, а потому рассмотрю здесь эту сторону исследования Бофуа, другие определения которого будут разобраны в следующей главе.

Полковник английской службы Бофуа в последней четверти прошлого столетия много занимался опытами, касающимися сопротивления, напр. качаниями маятников в жидкостях, сопротивлением воздуха, ветряными мельницами, сопротивлением воды наклонным плоскостям и т. п. Наибольшею известностью пользуются его исследования, произведенные в самом конце столетия, после того, когда (в 1791 г.) основалось богатое средствами Society for the Improvement of Naval Architecture, под председательством His Royal Highness the Duke of Clarence. Это общество дало возможность Бофуа произвести определение сопротивлений различных больших моделей, длиною часто 20—40 фут., в обширном (длина 400 фут., глубина 11 фут.) водоеме Гренландского дока близ Лондона. Первые опыты 1793—1795 гг. были сделаны с досками разной формы, плавающими на воде. Способы наблюдения Бофуа в сущности не отличались от тех, которые употребляли Борда (1763 г., черт. 26) и французские академики (1775 г., черт. 12), как видно на листах 4 и 5, черт. 35 и 39. Падающий груз тянул модель по воде, и когда скорость становилась постоянною груз этот представлял меру сопротивления. Хотя Бофуа применил у себя и некоторые немаловажные улучшения, сравнительно с приемами французов, напр. определял скорость механическим записыванием (при помощи самого прибора) пройденных путей,[1] достигал бóльших, чем были у французов, скоростей и т. п., но однако его первые определения немного выгадали от того и не отличаются ни особою точностью, ни каким-либо определенным направлением, словом, мало вносят нового в запас сведений о сопротивлении. Интерес исследований Бофуа начинается лишь с 1795 г., когда (см. черт. 39 и листы 6 и 7) он стал определять сопротивления тел, вполне погруженных в воду. Это потому, во-первых, что до сих пор вовсе не было систематических опытов подобного рода для случая прямолинейного движения, да и поныне опыты Бофуа (и после-

[1] Я избегаю здесь описания прибора Бофуа, потому что о нем будет речь в следующей главе и еще потому, что на листах, представляющих снимки с подлинных чертежей Бофуа (равно как и других исследователей), дано краткое описание аппаратов и приведены их масштабы (даны в виде дробей, т. е. отношения длины линий рисунка к действительной длине). Вообще я старался так составить чертежи, чтобы они облегчили знакомство с историею предмета, а потому особенно заботился — взять рисунки из подлинников.

довавшие за ними опыты шведских ученых) остаются единственными в своем роде. Достаточно напомнить, что Буржуа, Бурачек и др. при своих многообъемлющих исследованиях о сопротивлении воды исключительно опираются на эти опыты. Во-вторых, интерес опытов 1795—1798 гг. зависит от того, что часть их была направлена специально на определение трения или бокового, касательного (тангенциального) сопротивления, рождающегося на поверхностях, параллельных направлению движения, а потому прямо не участвующих в сопротивлении, которое зависит от удара тела о жидкость или от инерции. В этом втором ряде своих исследований Бофуа принял следующий способ нахождения сопротивления R погруженного тела. Сперва определялись скорости v и соответственные грузы p для одного поплавка или кондуктора с тем ниспускающимся в воду стержнем, к которому прикреплялись потом тела. Поплавки были разных форм и размеров (черт. 36, 39, 42, 52, 53, 72). Средние добытые результаты выражались интерполяционною формулою $p=kv^n$, где k и n постоянные. Они дают возможность знать p_0, p_1 ... для определенных или желаемых v_0, v_1 и т. д. Затем к стержню (примерно на глубине 6′ под водою) поплавка прикреплялось исследуемое тело (черт. 36 и 39) и опять определялись скорости v и соответственные грузы P, и ряд данных выражался $P=Kv^m$, что давало опять возможность знать для желаемых v_0, v_1 ... соответственные значения P_0, P_1 и т. д. Сопротивления погруженного тела при скоростях v_0, v_1 ... находились затем, вычитая p из P, а именно: $R=P_0-p_0$, P_1-p_1 ... Этим же способом находилось и трение. Для этого Бофуа прикреплял к поплавку по направлению пути (под водою) длинную доску (передний конец или заостренный, как на черт. 49 и 59, или тупой, как на черт. 74) и для нее определял сопротивления $R_0=P_0-p_0$, $R_1=P_1-p_1$ ..., соответствующие скоростям v_0, v_1 ... Потом, отпиливая весь задний длинный конец доски, оставлялась только самая передняя, носовая часть доски (черт. 50, 60, 75) и для нее определялось общим способом (вычитая p из P) сопротивление r_0, r_1 .., отвечающее скоростям v_0, v_1 ... Из разностей R_0-r_0, R_1-r_1 ... Бофуа и находил трение на поверхность отпиленной доски. Опыты этого рода были сделаны в три приема: в начале 1796, в конце 1796 и в 1798 г.; последним определениям Бофуа придает наибольшее доверие. [1] Приводим сравнение выводов для трех лет. Цифры выражают вычисленную предшествующим способом величину силы трения в фунтах [2] при скоростях v_2,

[1] В опытах 1796 г. взяты были доски, долго лежавшие в воде намокшие, а потому более шероховатые, чем в 1798 г., но, как увидим далее, трение вышло даже больше для гладкой доски 1798 г.

[2] Бофуа везде применяет английские фунты avoir du pois (предисловие, стр. LXXIV — выноска) = 16 унций = 7000 гран. = 453.5926 г.

выраженных футами в секунду, на площадь в 50 кв. фут.[1] Цифры эти (и другие, далее приводимые для Бофуа) взяты из того полного свода всех данных, добытых Марком Бофуа в Гренландском доке, который был издан его сыном Генрихом Бофуа в 1834 г. под названием „Nautical and Hydraulic Experiments, by Colonel Mark Beaufoy" vol. I (см. стр. 239, 397 и 487). Наблюдения производились при скорости от 1′.5 до 10′, а потому мы ограничиваемся сличениями для скоростей в 3, 6 и 9 фут., что принято нами и в дальнейшем изложении (гл. 2) некоторых других данных Бофуа.

	Число опытов для длинной и короткой доски	$v=3'$	$v=6'$	$v=9'$
		Трение на 50 кв. фут. поверхности Бофуа		
Февраль 1796 г. . . .	16 и 16	1.562	5.855	12.68
Октябрь 1796 г. . . .	22 и 18	1.5522	5.895	12.869
Ноябрь 1798 г. . . .	35 и 26	1.5882	6.2370	13.810
	Среднее	1.5675	5.9957	13.119

Прежде чем разбирать подлинные числа Бофуа, извлечем из его выводов те следствия, какие можно сделать, принимая метрическую систему измерения.

Переводя данное среднее (взятое со стр. 487) в метрические меры, получаем, что при скоростях 0.9144, 1.8288 и 2.7431 м в секунду трения 50 кв. фут. или на 4.6450 кв. м=0.7110, 2.7196 и 5.9507 кг, или на 1 кв. м = 0.1531, 0.5855 и 1.2811 кг, что вполне выражается уравнением

$$F = -0.0161 + 0.0411\ v + 0.1574\ v^2 \quad \ldots\ldots \text{(I)}$$

Так как при $v=0$ трение надо принять=0, то вероятнее допустить одно из следующих выражений: $F=Av+Bv^2$, или $F=Kv^n$; выразить же трение пропорциональным квадрату скорости невозможно, не удаляясь очень далеко от наблюдений. Первое выражение (подобное выражение применяли Буржуа и многие др.) приводит к формуле

$$F = v\ (0.022 + 0.1627\ v), \quad \ldots\ldots \text{(II)}$$

а второе к формуле

$$F = 0.1820\ v^{1.933} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \text{(III)}$$

Эта последняя (III) формула имеет такой же вид, как и формулы, которые принимал сам Бофуа, притом она отвечает хорошо средним выводам опыта,[2] а потому заслуживает некоторого доверия и, если прилагать прямо вывод Бофуа для изучения

[1] Футы английские (=русским). $1' = 0.304794$ м.

[2] Это потому только, что Бофуа все свои наблюдения, как увидим далее на примере, рассчитывает по такой же формуле.

сопротивлений, должно пользоваться ею. Она может быть удобно рассчитываема в виде:

$$\underset{\text{кг кв. метр.}}{\lg F} = \underset{\text{кв. метры}}{\lg S} + \lg 0.1820 + 1.933 \lg v, \quad \ldots\ldots \quad \text{(IV)}$$

где S есть боковая поверхность в квадратных метрах по направлению, совпадающему с направлением пути, и где v скорости можно брать только от 0.5 до 3 м (около до 6 узлов) в секунду. При высших (или низших) скоростях придется экспонировать, т. е. допустить, что формула верна и вне опытных пределов. Результаты эти могут быть выражены таблицею трений на 1 кв. метр.

При скорости v	= 1 м, 2 м, 3 м в секунду
Трение по Бофуа на S кв. м	$= S\,0.1820, S\,0.6950, S\,1.5218$ кг.
Коэффициент при v^2 или k	= 0.178 0.171

Для промежуточных скоростей можно пользоваться указанным коэффициентом, считая, что $F = kSv^2$. Вообще, так как при $v = 1$ величина $k = 0.182$, а при $v = 2.5$ близка к 0.171, то можно принять в этой формуле $k = 0.1895 - 0.0075\ v$, а потому $F = S(0.1895 - 0.0075\ v)\ v^2$. Для примера разочтем трение в опыте Боссю и Кондорсе над сопротивлением прямоугольного ящика, изображенного на 1 листе, черт. 8. Его размеры: длина 1.3 м, погружение 0.65 м, ширина 0.65 м, следовательно трущаяся поверхность, расположенная по направлению пути, = 2.535 кв. м. Высшая скорость была 0.835 м в секунду (все сопротивление тогда = 17.20 кг). Для этой скорости значение $k = 0.183$, а потому трение о бока и дно $F = 2.535 \cdot 0.183 \cdot (0.835)^2 = 0.323$ кг.

Изложенное составляет прямой вывод, сделанный Бофуа; нам нечего было бы сказать относительно приложимости такого способа расчета к частным случаям, если бы, во-первых, самое основание того приема, которым Бофуа определял сопротивление, не представляло многих пунктов сомнения, во-вторых, если бы Фроуд не показал, что трение, даже для досок, двигающихся по направлению своей длины, изменяется по мере их удлинения и, следовательно, не представляет пропорциональности поверхности, и, в-третьих, если бы сам Бофуа и масса других исследователей не применяли к наклонным плоскостям величину, найденную Бофуа для плоскостей, параллельных к направлению пути. Величина трения для наклонной и нормальной площадей вовсе не определяется опытами Бофуа, а потому невозможно применять его данные к этому случаю, напр. к определению трения воды о поверхность корабля, тем более, что к нормальной плоскости многие вовсе не хотят применять никакого понятия о трении, а здесь скорость воды, конечно, не ничтожна и трение, конечно, играет роль. Сообразно со сказанным, теперь мы и рассмотрим сперва подробности приемов Бофуа для определения

трения, а потом изложим наблюдения Фроуда, касающиеся того же предмета.

Так как наблюдения 1798 г. близки к предшествующим (1796 г.) и так как сам Бофуа предпочитает свои последние данные предшествующим, то в разборе приемов Бофуа мы ограничимся только данными 1798 г. Чтобы получить ближайшее понятие о приемах опытов, приведем один полный опыт для длинной доски и затем все непосредственные выводы из отдельных опытов для кондуктора, длинной и короткой доски. Эти числа дадут нам возможность приступить к оценке выведенных из них результатов. Кондуктор, длинная и короткая доска, о которых будет здесь говориться, изображены на 7-м листе, черт. 72, 73 (поперечный разрез кондуктора), 74 и 75. Там же даны их размеры. Длина кондуктора 25′10″, длина доски 14′, короткой 2′. Стержень в разрезе эллиптический, один, укреплен в поплавке около самой его кормы, а у досок — на середине.

Стр. 488 и XCVI: 6 ноября 1798 г. Новый кондуктор, стержень и длинная доска, углубление центра 6 фут. Температура воздуха 47° Ф., воды в доке 47° Ф. (то же или почти то же и в других определениях). Глубина воды в доке 12′6″. Ветер W. N. W. умеренный. Система 4-ная (2 подвижных блока, см. черт. 39). Весь груз 52 фунт., действующий груз 12 фунт. Для увеличения начальной скорости цепь о 12 звеньях (см. следующую главу, Бофуа).

Первый опыт			Второй опыт	
Секунды	Пройденный путь, футы	Разность	Путь, футы	Разность
4	5.75	5.75	3.55	3.55
8	16.35	10.60	12.95	9.40
12	29.62	13.27 [1]	25.50	12.55
16	43.57	13.95	39.25	13.75
20	57.30	13.73	53.12	13.87
24	70.72	13.42	66.68	13.56
28	84.15	13.43	79.92	13.24
32	97.63	13.48	93.32	13.40
36	111.00	13.37	106.65	13.33
40	124.42	13.42	120.00	13.35
44	137.90	13.48	133.32	13.32
46	144.70	6.80	140.10	6.78
48	151.48	6.78	146.78	6.68
50	158.26	6.78	153.60	6.82
52	165.06	6.80	160.35	6.75
54	171.85	6.79	167.10	6.75

[1] В подлиннике по опечатке эти числа напечатаны в таком порядке: 13.95, 13.73, 13.42 и 13.27. (*Прим. ред.*)

В каждом опыте видно, что сперва пути, проходимые прибором в 4 сек., возрастают (скорость приобретается от груза и от цепи, которая затем достигает земли и сваливается, остается один груз), доходят почти до 14 фут. в 4 сек. (тогда еще действовал груз цепи, затем он сваливается), потом постепенно уменьшается и делается постоянною.[1] Затем наблюдаются положения чрез 2 сек., и последние при наблюдении одни принимаются в расчет, а потому в расчет приняты здесь скорости, отвечающие 1 секунде:

3.390	Средние	3.410
3.400	3.3950 3.3866	3.375
3.395	3.3908	3.375

Найденная средняя скорость исправляется затем в отношении неточности делений, нанесенных на линейке, отмеривающей пройденные пути. Эти поправки здесь $= +0.0173$ фут., а потому наблюденная скорость при 12 фунтах двигающего груза $=3.3908+$ $+0.0173=3.4081$ фут. Это значит, что при этой скорости сопротивление поплавка, стержня и длинной доски $=12$ фунтам. Очевидно из этого случайно (сначала) взятого примера, что точность данных нельзя считать достигающею до сотой фута, уже по одному тому, что тысячные не наблюдались и в делении шкалы были ошибки этого порядка. Собственно, и в сотых фута несомненно были неизбежные погрешности, как видно, напр., из того, что тот же прибор, при 48 фунтах движущего веса, дал в 4 рядах, приведенных на стр. 491, скорости: 6.5833, 6.5583, 6.6467 и 6.6083 фут. Среднее из них 6.5992 не сходится со средним, относящимся к 2-м принятым в расчет опытам, приведенным на стр. XCVII (введения)=6.6275. Поправка на шкалу= $= +0.0404$. Так и в других случаях. А потому мы приводим далее только сотые исправленных средних скоростей. Так получены следующие прямые результаты наблюдения.

Движущий вес или сопротивление	12	24	36	48	60	72	96	120 ф.
Кондуктор + длинная доска, исправленные средние скорости	3.41	4.89	5.85	6.64	7.32	8.15	9.32	10.28
Кондуктор + короткая доска, исправленные средние скорости	3.71	5.23	6.31	7.11	7.89	8.60	9.75	11.02
Кондуктор (со стержнем без доски)	4.57	6.18	7.40	8.32	—	10.01	—	—

[1] Сохраняем множественное и единственное число, как у Д. И. Менделеева. (*Прим. ред.*)

Первое, что здесь бросится в глаза: скорости при тех же грузах очень мало растут при переходе от длинной доски к короткой и сильно возрастают при переходе от этой последней к одному кондуктору. Следовательно, сопротивление короткой доски велико, а разность, происходящая от трения, мала. Общее же опытное правило состоит в том, чтобы суждение о малой искомой величине выводилось по возможности независимо от больших входящих величин. Подобное правило Томсон и Тейт выставляют в своей теоретической физике первым в ряду рекомендуемых для руководства экспериментаторов. Если я решаюсь делать это замечание Бофуа, то, конечно, только потому, что важность предмета требует от основных опытов полной безукоризненности их постановки (хотя бы точность и была не велика), и еще потому, что дальнейшая разборка приведенных чисел дает повод сомневаться в тех выводах, которые делает из них Бофуа. Для того, чтобы правильно итти далее, необходимо вышеприведенные данные подвергнуть интерполированию, чтобы узнать сопротивления, отвечающие данным скоростям. Интерполирование чисел первой строки (для кондуктора + длинная доска) мы ведем, исходя из двух соображений: 1) что при $v=0$, сопротивление $r=0$ и 2) что сопротивление близко к пропорциональности квадрату скорости. Поэтому мы отыскиваем числа $\frac{r}{v^2}$ и выражаем их затем двучленом $a+bv$. Деля сопротивления на квадраты скоростей, получаем ряд, соответствующий кондуктору + длинная доска:

$v=3.41$	4.69	5.85	6.64	7.32	8.15	9.32	10.28
$\frac{r}{v^2}=1.03$	1.00	1.05	1.09	1.12	1.08	1.11	1.14

Из сравнения этих величин уже видно, что сопротивление растет быстрее, чем квадраты скоростей, но возрастание довольно неправильно, а потому мы можем ограничиться двучленным выражением вида $\frac{r}{v^2}=0.937+0.020\ v$. Поэтому рассчитываются для данных v следующие значения $\frac{r}{v^2}$:

1.01 1.03 1.05 1.07 1.08 1.10 1.12 1.15.

Соответственные разности вычисления и опыта суть:

+0.02 −0.03 0.00 +0.02 +0.04 −0.02 −0.01 −0.01.

Они показывают, что выражение

$$r=v^2(0.937+0.02\ v)$$

удовлетворяет в достаточной мере наблюдению. Бофуа интерполирует по формуле $r=kv^n$. Для сличения его способа с тем,

который мы употребили в данном случае, найдем значение v для сопротивлений:

$r =$ 24 48 72 120 фунт.

По нашей вышеприведенной формуле получаются значения:

$v =$ 4.82 6.70 8.09 10.26.

Разность этих чисел от наблюденных скоростей:

+0.07 −0.06 +0.06 +0.02

не превышает возможных погрешностей опыта. Бофуа дает, рассчитывая по формуле $r = kv^n$, следующие регулированные скорости для вышеуказанных значений r (стр. 487):

4.75 6.59 7.98 10.16.

А они представляют от наблюдения разности:

+0.14 +0.05 +0.17 +0.12.

Т. е. его рассчет постоянно меньше наблюдения и отступления крупнее, чем по нашей вышеприведенной формуле. По этой причине для разбираемых данных мы вышеприведенным способом рассчитываем следующие интерполяционные формулы:

Кондуктор + длинная доска . . . . . $R = v^2 (0.937 + 0.020\ v)$
Кондуктор + короткая „ . . . . . $R_1 = v^2 (0.777 + 0.022\ v)$
Один кондуктор . . . . . $R_2 = v^2 (0.458 + 0.027\ v)$

Эти формулы дают возможность узнать сопротивления при равных скоростях.

Скорость	$v =$ 5	10	фут.
Сопротивление кондуктора + длинная доска . . .	$R =$ 25.9	113.7	фунт.
„ „ + короткая доска . . .	$R_1 =$ 22.2	99.7	„
„ одного кондуктора	$R_2 =$ 14.8	72.8	„

В параллель с этими данными приводим данные, рассчитанные для 5′ и 10′ скорости самим Бофуа: R=26.8 и 116.0, R_1= =22.8 и 100.4, R_2=14.6 и 71.9. Сверх того, от него же (стр. 688) берем величины сопротивлений для тел, имеющих спереди нормальную площадь, как и доски, служившие для определения трения. Таковы для 1798 г. тела *Ia* (черт. 94), *Io* (черт. 95), *Ih* (черт. 97) и *Lq* (черт. 101). Передняя площадь у всех их = 1 кв. футу и сопротивление при 5′ скорости было 23.0, 22.8, 25.5, 23.3, а при 10′ скорости 87.4, 87.0, 98.0, 93.1, т. е. сопротивления мало разнятся, хотя кормовые формы тел разные, а потому можно принять, что при плоской передней части доски (особенно для короткой) ее прямое сопротивление было бы около =24 фунт. при v=5′ и около 90 фунт. при v=10′, если бы

передние площадки досок были = 1 кв. футу. В действительности площадь переднего края или сечение досок были = 0.417 кв. фут., потому что высота = 1′8″, толщина 3″. Следовательно, судя по вышеисчисленным телам и считая сопротивление пропорциональным площади, надо для досок короткой и длинной ждать прямого сопротивления, близкого к 24·0.417 = 10 фунт. при скорости 5′, а для скорости 10′ близкого к 90·0.417 = 38 фунт. Вычитая сопротивление кондуктора R_2 из сопротивления (кондуктор + короткая доска) R_1, получаем разность для $v = 5'$ $R_1 - R_2 = 7.4$, что уже гораздо меньше вышенайденных 10 фунт. Для $v = 10'$ точно так же $R_1 - R_2 = 26.9$, что уже много менее 38 фунт., которые можно ждать, считая сопротивление пропорциональным площади. Считая даже, что сопротивление переднего конца короткой доски так же мало, как сопротивление тела *Io* (черт. 95), снабженного длинною заостренною кормою, уменьшающею сопротивление, должно ждать для короткой доски при 10′ скорости сопротивления 87.0·0.417 = 36.3, что гораздо более найденных из разности 26.9 фунт. Что-либо одно из трех: или в наблюдениях Бофуа, даже в 1798 г., заключаются большие погрешности, доходящие до 10 фунт., а тогда судить о трении, составляющем величины этих размеров, — нельзя; или же, судя по согласию повторенных наблюдений, должно считать неудовлетворительным принятый Бофуа способ извлечения выводов из данных опыта; или же, наконец, доски Бофуа имели спереди и в 1798 г. такой же заостренный передний конец, как в 1796 г.[1] Допустить же отсутствие хотя бы не полной, а только приближенной пропорциональности сопротивлений площадям при равных очертаниях и относительных длинах — конечно, было бы совершенно неосновательно.

---

[1] Тогда прямое их сопротивление должно было бы быть меньше, чем 10 и 38 фунт. при 5 и 10 фут. скорости. Такое мнение отчасти подтверждается изображением досок 1798 г., помещенным в первоначальном отчете, который в недавнее время я имел случай получить из библиотеки гидрографического департамента, начальству которой я много благодарен за ту готовность, с какою оно дало мне доступ к этому богатому собранию редких сочинений по морскому делу. Упомянутый отчет озаглавлен: „The report of the Committee for conducting the experiments of the Society for the Improvement of Naval Architecture." В нем описаны опыты Гренландского дока за 1795—1798 гг. (имя Бофуа в нем не упоминается) и надо думать, что отчет явился в 1799 или 1800 г. (в отчете год не дан), потому что при нем приложен русский (письменный) перевод (Г. Ф. Карнавина), сделанный в 1801 г. На таблице I этого отчета концы досок ясно изображены полуцилиндрически округленными. В отчете же, публикованном (1834 г.) г. Бофуа (сыном), концы досок два раза (в тексте и в таблицах) изображены срезанными под прямым углом. Заметим, что при цилиндрически округленной передней поверхности сопротивление = всего 7 или 25 фунт. при $v = 5$ и 10 фут. как видно для тел *Ka* и *Ko* (лист 7, черт. 92, 93), мидель которых = 1 кв. футу. Эти числа дают для переднего сопротивления чересчур малые величины для досок, а именно 3 и 10 фунт. (считая сопротивление пропорциональным миделю).

Такой же расчет, как выше для короткой доски, сделаем для длинной. Данные для 5′ $R=25.9$ и для 10′ $R=113.7$ должны, судя по приему Бофуа, содержать сопротивление кондуктора + прямое сопротивление сечения + трение, но сопротивление кондуктора = 14.8 и 72.8, сопротивление сечения около = 10 и 38 фунт. для 5 и 10′ скорости. Сумма этих величин есть 24.8 и 110.8, т. е. исчерпывает почти всю величину найденного сопротивления, а на трение остается только 1.1 и 2.9 фунт. Величины эти вовсе не сходны с принятыми Бофуа и выводимыми из разностей $R-R_1$, которые равны 3.7 и 14.7 для 5 и 10′ скорости. Прибавим к этому еще следующие три замечания. 1) Сам Бофуа, интерполируя по способу, данному Хуттоном ($r=kv^n$), получил иные цифры, более отдаленные от действительности, чем цифры вышеприведенного приема интерполирования, как видно было из примера, приведенного выше для кондуктора + + длинная доска. Для 5 и 10′ он выводит из $R-R_1$ величину трения 26.8—22.8=4.0 и 116.0—100.4 = 15.6; эти цифры больше правильно рассчитанных 3.7 и 14.0 фунт. 2) Если вообще Бофуа делает вычитание из чисел сопротивления R—тела + кондуктор чисел для одного кондуктора R_2, чтобы найти сопротивление тела r, то при этом очевидно предполагается, что сопротивление кондуктора остается одинаковым в обоих случаях. А это едва ли согласно с действительностью. Достаточно взглянуть на чертежи кондукторов Бофуа и обратить внимание на место стержня, бывшего в опытах 1798 г., чтобы видеть необходимость изменения в положении движущегося поплавка после прикрепления к нему тела. Груз тела и величина сопротивления должны изменять в покое и в движении положения поплавка, влекомого веревкою, привязанною к носу поплавка, да еще сверху. Если же допустить, как это необходимо, некоторую перемену положения поплавка на воде (различие дифферента на нос или на корму, изменение погружения) в случае прикрепления к нему тел, то сопротивление поплавка в этом случае будет не то, какое при движении его одного, а потому из R надо вычитать не R_2, а некоторую другую величину, чтобы найти r. Этим только способом можно объяснить то, что нашли мы выше для кондуктора + длинная доска. 3) Если же к стержню кондуктора прикрепляются примерно однообразные тела—крен будет примерно тот же, и числа выйдут, очевидно, согласные, как это и замечаем для случая тел *Jo, Ja, Jh, Lq* и случая короткой доски. Тела здесь малые, сопротивления действуют почти на одинаковые места и т. п., а потому вывод из одних тел прилагается к другим. Это не значит, однако, что вывод верен. Пусть R_2 есть сопротивление свободного кондуктора, R_0 сопротивление кондуктора + + одно тело, R_1 сопротивление кондуктора + другое тело, подобное вышеприведенному, и пусть R_3 есть неизвестное со-

противление кондуктора в том его положении, когда к нему прикреплены тела. Истинные меры сопротивлений тел будут $R_0 - R_3$ и $R_1 - R_3$, но не $R_0 - R_2$ и не $R_1 - R_2$,[1] а однако разность истинных сопротивлений двух тел будет, очевидно, равна разности неверных чисел $R_0 - R_1 = (R_0 - R_2) - (R_1 - R_2)$. Поэтому можно сравнивать (арифметически, но не геометрически) неверно найденные сопротивления тел подобных и достигать совершенно верного вывода. Но если прикрепляются тела совершенно иного вида, напр. вместо короткого длинное, вместо легкого тяжелое, как это и есть при замене большой доски малою, то точное сравнение невозможно, потому что тогда в двух случаях положение поплавка будет разное и неизвестная величина сопротивления поплавка в обоих случаях будет иная, а потому тогда, идя обычным способом, каким шел Бофуа, получатся числа несравнимые между собою.[2]

Итак, в числах, данных Бофуа для бокового трения, должно подозревать погрешность, им нельзя *вполне* доверять. Боковое трение, вполне доказываемое опытами и измерениями Кулона (сделанными после Бофуа), в определениях Бофуа приобретает только приближенное значение, и не будь опытов Кулона, с одними опытами Бофуа можно было бы даже сомневаться в самом существовании бокового трения, тем более, что, употребляя длинную доску, при малейшем уклонении от параллелизма ее оси с осью поплавка, можно ждать возрастания сопротивления не от трения, а от одного уклона, и еще потому, что, судя по опытам французских академиков и Дю-Бюа, можно ждать для призматического тела даже уменьшения сопротивления при некотором возрастании длины. Впрочем, есть одно обстоятельство, которое говорит в пользу чисел для трения, данных Бофуа; это именно — согласие его определений 1796 г. с данными 1798 г. Если взять эти последние и принять разность $R - R_1$ за трение (стр. 55), то по расчету оно равно 3.7 и 14.0 фунт. для $v = 5$ и $10'$. Боковая поверхность отрезанной доски $= 12' \left(1\frac{2}{3} + \frac{1}{4}\right) 2 = 46$ кв. фут. Поэтому для скоростей 5 и $10'$ трение в опытах 1798 г. выходит на 50 кв. фут. равным 4.0 и 15.2 фунт., а не 4.36 и 16.97, как принимает Бофуа (стр. 487). В опытах

[1] В подлиннике опечатка: R_1. (*Прим. ред.*)

[2] Из морской практики известно, что сопротивление значительно меняется при крене на нос или на корму, но так как зависимость этого изменения от формы тел неизвестна, то и нельзя ныне подвергнуть подобные случаи расчету. Бофуа должен был бы, если бы выяснил указанные причины погрешности своих опытов, устранять их, определяя сперва крен и углубление, а потом поправляя их перемещением и наложением особых грузов, или же определяя для кондуктора сопротивление при разных углах крена и углублениях. Вопрос этот сам по себе представляет интерес и может служить предметом опытного исследования большой важности.

1796 г. для 5′ скорости получены числа, очень близкие к 4.0 фунт., а именно 4.1 и 4.2, а для $v=10$ в 1796 г. Бофуа выводит трение на 50 кв. фут. равным 15.5 и 15.8 фунт.; это опять близко к 15.2, определяемым из опытов 1798 г. Это дает в среднем для $v=5'$ трение на 50 кв. фут. $r=4.1$ фунт., для $v^2=10'$ трение—15.5 фунт., что выражается общею формулою $r=v^2(0.173-0.0018v)$. Далее (именно, при разборе опытов Фроуда) мы увидим, что выражение $f=av+bv^2$ лучше и проще других отвечает трению, а потому из средних данных Бофуа ($v=5$, $r=4.1$; $v=10$; $r=15.5$) выводим, что трение f на плоскостях параллельных пути:

$$f=s\ (0.0018\ v+0.00292\ v^2)$$ англ. фунт. на s кв. фут.,

или:

$$f=S\ (0.029\ v+0.1536\ v^2)$$ кг на S кв. м. . . . . (V)

Это выражение дает трение по Бофуа с точностью большею, чем предшествующее выражение (II), (III) и (IV). При грубом приближении можно считать

$$f=Sv^2\ 0.16$$ кг на S кв. м. . . . . (VI)

Важнее же всего заметить, что при тех малых скоростях (сантиметры в секунду), с какими имел дело Кулон (стр. 323), трение почти пропорционально 1-й степени скорости, а здесь (скорость — метры в сек.) почти 2-й степени. Только будущие новые опыты решат: зависит ли это от того, что у Кулона было движение колебательное, а здесь поступательное, или только от разности скоростей?

Основные недостатки, свойственные опытным приемам Бофуа, вполне устраняются в новейших определениях бокового трения, произведенных в Англии же, в 1872—1874 гг. Фроудом. У него не поплавок, а тележка на рельсах; идущих поверх длинного канала с водою, а потому нет возможности сомневаться в том, что доска, прикрепленная к тележке, изменяет ее положение. Притом у него определяется не груз, нужный для сообщения скорости тележке и доске, трение которой определяется, а у Фроуда на тележке пружина, которая растягивается, как динамометр, от силы сопротивления доски. Затем у Фроуда передний конец доски заостренный (черт. 104, лист 8), потому прямое сопротивление от переднего конца доски малое, так что почти одно трение доски о воду и влияет на меру удлинения динамометрической пружины, состояние которой во все время записывается (регистрируется) на вращающемся цилиндре, находящемся на тележке (лист 8, черт. 103). У Бофуа трение только малая доля $\left(\frac{1}{6}\right)$ всего сопротивления, у Фроуда все побочные влияния составляют только ничтожную $\left(\frac{1}{20}\right)$ долю трения. Кроме всего этого

Фроуд берет доски не двух, а многих размеров (лист 9, черт. 107), а именно длиною от 6 дюйм. до 50 фут. А все же, при всех усовершенствованиях, Фроуд есть только прямой продолжатель Бофуа. Приемы их в сущности те же. У обоих доска движется в воде вдоль своей оси, помещается ребром. То же у обоих стремление взять у природы числа, нужные для английского мореплавания, при помощи колоссальных средств [1] богатой страны, увеличивая размеры исследования, даже те же почти длины, удивляющие величиною — у Бофуа в первом опыте, 11 октября 1793 г., была доска в 42.198 фут. длиною, у Фроуда — в 50 фут. Размеры эти могут казаться полезными для опыта технического, но для установки основных научных вопросов нужны не эти многосаженные размеры, а нужно главнее всего спокойное, критическое и разностороннее отношение к опыту, которое убивается при этих невозможных для научного исследования размерах. Мы видели, что сделал и что упустил Бофуа, посмотрим, что сделал Фроуд, и увидим, не упустил ли и он чего-либо, задавшись обширными размерами опытных исследований. Впрочем, относительно Фроуда нельзя следовать тому приему, какому мы следовали, излагая наблюдения Бофуа.

Исследования этого последнего описаны вполне, каждый опыт дан со всеми своими числами, даже, пожалуй, есть излишек, роскошь чисел — громадный том — весь из цифр, добытых Бофуа. Все же то, что публиковано относительно опытов Фроуда, может быть вмещено на печатном листе, и ни один опыт не дан в виде сырых, прямо полученных чисел; известны только выводы, результаты. Разве ныне, когда Фроуд уже потерян для науки, соберутся публиковать его подлинные данные. В прошлом 1878 году, когда Фроуд был еще жив, я получил, по его обязательности, чрез посредство В. И. Святского, единственные — это его слова, — имеющиеся в печати отчеты об его исследованиях. Так как они невелики и помещены в издании сравнительно редком, в отчетах британской ассоциации для движения наук (Report of the British Association for the Advancement of Science, Brighton, 1872, p. 118 и Belfast, 1874, p. 249), то я считал за наилучшее приложить к этому изданию полный перевод двух рапортов Фроуда (приложения 6 и 7) и снять (листы 8 и 9)*

[1] Генр. Бофуа в предисловии (p. XXXII) говорит о том, что опыты его отца и шведские опыты стоили до 50 000 фунтов стерлингов, что на наши деньги составит около полумиллиона руб. Опыты Фроуда потребовали громадных средств английского адмиралтейства, судя по тому, что устроено для них особое здание над длинным водоемом, заведены особый двигатель и целая система приспособлений. Эти богатые средства, данные Англией для изучения сопротивления, надо сознаться, принесли малые плоды, оставили почти все не разрешенным, что было ранее не разрешено, мне кажется потому преимущественно, что были чересчур близкими к размерам и задачам практики; чистая наука была в стороне.

рисунки и диаграммы, которыми снабжены отчеты Фроуда. Это избавляет меня от изложения приемов исследования и передачи хода мыслей Фроуда о трении. Мне остается лишь указать на способ постановки вопроса о сопротивлении, бывший в виду у Фроуда, и затем высказать мои соображения, касающиеся его опытов. При этом я буду предполагать, что прилагаемые здесь переводы статей Фроуда уже прочтены читателем.

Как смотрит Фроуд на сопротивление, видно из его чтения, помещенного в приложении 8 (и может быть найдено желающими в „Морском Сборнике" за 1877, № 4). Это изложение понятий Фроуда о сопротивлении воды сделано им в Кенсингтонском музее в 1876 г. во время бывшей тогда в Лондоне выставки научных приборов и после ряда его различных опытов, а потому заключает, так сказать, венец исследования. Достаточно сличить это изложение с тем, которое выражает сущность фрикционной теории Ранкина (Морской Сборник, 1867, №12), чтобы видеть, что Фроуд — прямой последователь этой теории. Для нее корабль с правильными обводами требует для придания ему определенной скорости некоторой силы совершенно по иной причине, чем угловатая модель, хотя бы такая, как в опытах Боссю (черт. 7) или в опытах Бофуа (лист 6, 7). У модели работа двигателя идет на сообщение некоторого количества движения воде, образующей водовороты впереди, подле и за моделью, у корабля же с должными образованиями работа двигателя идет исключительно на образующиеся волны, да на трение воды о бока корабля. Таково положение теории Ранкина. Мы возвратимся к этому предмету далее, теперь нам важно лишь указать на то, что Фроуд держался фрикционной теории, а она в трении видит главную затрату двигателя, главную причину сопротивления, хотя бы для корабля, если не для угловатой модели. Немудрено, что Фроуд направляет средства английского адмиралтейства и все свои силы для определения величины трения на бока корабля. Исследования Фроуда приводят его к тому, что трение на движущуюся длинную доску не пропорционально поверхности, а уменьшается с ее длиною, примерно так, что если близ самого носа на 1 кв. фут гладкой поверхности, при скорости 10′ в секунду, трение около = 0.4 фунт., то на расстоянии 50 фут. от носа приходится лишь около половины этой величины. [1] В среднем величина эта

[1] В 7 приложении дана таблица чисел, выведенных Фроудом. На листе 9 даны диаграммы, выражающие результаты его наблюдений. Из совокупности чисел видно, что гладкие поверхности представляют почти одинаковые сопротивления, покрыты ли они лаком, парафином или оловом. Для этих [поверхностей] средний результат для 10′ скорости: трение на 1 кв. фут при расстоянии $d = 2'$, $r = 0.352$; при $d = 8'$, $r = 0.262$; при $d = 20'$, $r = 240$ и при $d = 50'$, $r = 0.229$. Очевидно из характера данных, что сопротивление при $d = 0$ будет представлять некоторую величину, а при большом возрастании длины r стре-

близка к данной Бофуа, который дает для $v = 10'$ $r = \frac{15.5}{50} =$ $= 0.31$ фунт. Изменение трения со скоростью у Фроуда выходит такое же почти, как у Бофуа, т. е. трение почти пропорционально 2-й степени скорости. Так средняя степень n [1] скорости для гладких поверхностей (как парафин, олово) при доске длиною 2 фут. $=$ $= 2.04$, при длине 8 фут. она $= 1.93$, при длине 20′ она $= 1.90$, при 50′ длины она $= 1.83$. Здесь она явно уменьшается с длиною. Но для опытов, сделанных Фроудом с досками, покрытыми песком (3 различных степеней мелкости), сопротивление возрастает с большою правильностью постоянно пропорционально квадрату скорости. Это последнее обстоятельство, в связи с тем, что, по опытам Бофуа, трение растет пропорционально 1.933 степени скорости, противопоставленное с тем, что в опытах Кулона трение растет пропорционально 1 (первой) степени скорости, требует отнестись с надлежащей разборчивостью ко всем подробностям английских опытов о трении, тем более, что Кулоновы опыты ведены по способу, совершенно хорошо ныне исследованному и представляющему все условия точного научного опыта, хотя и сделаны в малом виде и при непостоянных скоростях кругового качательного движения. Разбирая приемы и способ извлечения выводов Бофуа, мы видели там поводы сомнения в численных результатах. Внимательный разбор того, что известно об опытах и выводах Фроуда, не освобождает и эти последние от некоторых поводов к сомнению.

Важнейшее из обстоятельств, бросающихся в глаза при разборе отчетов Фроуда, касается его способа расчета величины трения из показаний динамометра. Очевидно, что кроме истинного трения о поверхности, параллельные с направлением пути, в показаниях динамометра должны участвовать еще следующие

мится к некоторому постоянному пределу, а потому зависимость r от d можно выразить формулою $r = 0.223 + \frac{0.647}{1 + 2d}$, которая хорошо согласуется с выписанными средними. Интегрируя от 0 до d, получим сопротивление для доски шириною в 1 фут, длиною в d фут. $R = 0.223d + 0.745 \lg (1 + 2d)$, что дает с достаточною точностью (для скорости 600 фут. в минуту) точки соответственной кривой, изображенной на черт. 108 (лист 9). При $d = 14'$, как было у Бофуа в 1798 г., для $v = 10'$, по выведенной выше интегральной формуле, вычисляется $R = 4.293$, следовательно на 1 кв. фут трение равно 0.307, а на 50 кв. фут. $=$ $= 15.35$ фунт., судя по данным Фроуда, а по опытам (1798) Бофуа, как мы видели выше, трение $= 15.2$ фунт. Отсюда видно, какое замечательное сходство представляют данные Фроуда и Бофуа о трении. В дальнейшем изложении мы увидим однако, что, взяв прямые данные Фроуда (с диаграмм), есть повод думать, что трение не зависит от длины доски, а оказалось у Фроуда таким лишь от того, что он не различил сопротивления носа и кормы, бока которых наклонны к пути, от сопротивления тех частей доски, которые действительно не имеют наклона и параллельны с направлением движения.

[1] В формуле сопротивления $r = kv^n$.

величины сопротивлений: 1) сопротивление воздуха на подвижные части динамометрических приспособлений; 2) сопротивление воды на тот стержень, который скрепляет подвижные части динамометра с металлическою носовою частью доски; 3) сопротивление воды на выдающиеся части доски или ее неровности, столь значительные в том случае, когда доски покрыты песком или коленкором, и сравнительно малые для досок гладких, покрытых лаком, парафином, оловом или салом;[1] 4) сопротивление воды на толщу доски, на ширину ее или сечение, зависящее от формы носа и кормы или от углов встречи и отступления воды и движущегося тела (если кому угодно это принять за трение, то все же оно будет иное, чем для параллельных площадей, а именно трение о наклонные плоскости, около которых скорость больше, чем у параллельных плоскостей); 5) сопротивление верхней и нижней кромки доски от возможности гнутия, зависящего не только от некоторой разности в плотностях воды и доски, но еще и от того, что во время движения легко могут родиться такие силы, которые выведут ось доски из ее параллелизма с рельсами, по которым движется динамометр, и 6) сопротивление от возможности гнутия тонких и длинных досок вправо и влево от их первоначального параллельного рельсам направления и от возможности колебательных, т. е. змееобразных или волнообразных движений длинной тонкой доски.

Только первое из вышеупомянутых сопротивлений прямо определено Фроудом, дано им на диаграммах (напр. *E* на черт. 105 и *D* на черт. 106) и, конечно, вычтено из наблюдаемого показания динамометра в окончательных результатах, напр. тех, которые нанесены на черт. 108, 109, 110. О втором роде добавочного сопротивления Фроуд не упоминает, оно ясно само по себе и, конечно, им принято во внимание. Можно даже думать, что под словами „и т. п.“,[2] стоящими в изъяснении, сопровождающем диаграммы, на которых нанесены линии *E* и *D* (черт. 105 и 106), что под ними Фроуд подразумевал столь очевидное сопротивление воды на верхний брус, скрепляющий динамометр с доскою

---

[1] Для практики, напр. для мореходного дела, конечно, внешняя поверхность корабля может быть рассматриваема, как поверхность, сопротивляющаяся ходу только вследствие трения. Так глядит и Фроуд. Но в научном смысле, конечно, не все равно, какова поверхность. Если представить, например, поверхность судна покрытою всю водорослями, ракушками и т. п. возвышениями, то сопротивление от них возрастет не в силу одной увеличенной и нового свойства поверхности, но и в силу того, что по новой поверхности будут входящие и выступающие углы, около которых рождается прямое сопротивление, в виде ли водоворотов, или просто от нового действия инерции, но во всяком случае от того же самого, от чего пластина, поставленная противу течения или движимая в воде, представляет прямое сопротивление.

[2] По-английски стоит, напр. для объяснения линии *E* (черт. 105), следующее: EE. Air Resistance of Apparatus Supporting Plane etc.

и погруженный отчасти в воду.[1] Весьма важно третье добавочное сопротивление — от неровностей. Фроуд получил для песчаных поверхностей и для коленкора бо́льшее трение, чем для гладких поверхностей, и, судя по всему тону изложения своих статей, приписывает это качеству поверхностей, т. е. прежде всего их природному, так сказать, химическому различию, а затем их механическому сложению. Что так, а не как иначе Фроуд понимает при этом слово *качество* (quality of the surface) поверхности, видно из того, что он отдельно приводит в обоих своих рапортах и даже в диаграммах сопротивление одинаковых досок, покрытых лаком, составом Гэ, парафином и т. п. Небольшие разности чисел он приписывает, очевидно, разности поверхностей. Это с руки грубой практике, в которой верят подобным предрассудкам. Но научной критики такое суждение выдержать не может. Кулон в своем исследовании явно доказал, что смазка салом ничего не изменяет в трении, и доказал это с тем же диском, с которым сделал определение до и после смазывания салом, — это прием верный. Если бы он взял два разных диска, один смазал, а другой нет, и вышла бы разность, он не мог бы сделать своего вывода. А Фроуд сделал именно такой вывод: взял именно разные доски, а не одну и ту же, до и после смазки. Вся разность отдельных определений Фроуда для разных гладких досок при разной покрышке, по всему вероятию, зависит только от того, что для каждой смазки брались им отдельные доски, или толщина наносимых слоев была неодинакова, или, что отчасти видит и сам Фроуд, при разных смазках степень неровностей у поверхностей досок была неодинакова. Если бы мы имели подробный отчет отдельных опытов, то можно было бы решить это с полной уверенностью, особенно если бы было несколько отдельных досок с одною покрышкою. Теперь же нам можно судить только о результатах, выраженных диаграммами. Если, напр., сличить кривые $A'A'$ (черт. 105), отвечающие покрышке лаком и составом Гэ, то очевидно, что везде, т. е. при всех скоростях, вторая дает меньшее сопротивление, чем первая. Но тут же рядом приведены данные для доски с тупым носом, — те еще больше. Тут причина чисто механическая и постоянная, нарочно взятая, а при переходе от одной поверхности к другой, конечно, также было различие механическое (толщина слоя, гладкость, влияние смазки на материал доски, т. е. на дерево, и т. п.), — ему прежде всего и надо приписать разность результатов. На черт. 109 и 110 ясно, что гладкие поверхности представляют чрезвычайно близкие числа, резко отличающие эти поверхности от шероховатых и песчаных. Пока

[1] При подобном подробном разборе Фроуда становится очевидным и ясно ощутительным недостаток подробных отчетов об его опытах.

нет численных доказательств относительно такой степени точности приемов Фроуда, которая удостоверяла бы, что *разные доски* одного и того же размера и одной покрышки дают числа, между собою согласные в гораздо большей степени, чем такие же доски только при одном различии поверхностей, до сих пор нет основания, после опытов Кулона, допускать какое-либо различие в сопротивлении досок, отличающихся только качеством своей одинаково-гладкой поверхности. Поэтому данные для всех гладких поверхностей следует считать пока одинаковыми и средний для них вывод принимать за вероятнейший. Мы постараемся теперь получить из подлинных диаграмм (воспроизведенных в уменьшенном виде на листе 9) Фроуда средний вывод для средней гладкой доски разной длины при разных скоростях. Для того, чтобы воспользоваться всеми нанесенными на диаграммы наблюдениями с гладкими досками разной длины, мы поступаем так. Для данной длины отбираем из каждой диаграммы несколько чисел, выражающих при данной скорости меру сопротивления, потом, взяв среднее из них, делаем в нем поправку на сопротивление воздуха, руководясь числами, отвечающими линиям E и D (черт. 105 и 106), затем на основании этих чисел можно будет уже итти далее.

Числа, взятые с диаграмм для всяких гладких досок. Означаем d длину досок в футах; v скорость фут. в минуту (как дано в диаграммах). Они даны в заголовке столбцов, а в столбцах даны соответственные сопротивления в фунтах (число взятых точек дано в скобках; если его не дано, взята одна точка). Ширина всех приведена к одному футу окружности доски и все

	Длина доски формы	$v = 100'$	200′	400′	600′	800′
Черт. 105	$d = 50$	$r = 0.38$	1.64(3)	5.93(3)	12.53(3)	—
Черт. 110	50	0.46	1.68	5.87	12.40(2)	—
Черт. 105	28	0.27	1.01	3.64	7.73	13.0
Черт. 109	20	0.20	0.70(3)	2.50(3)	5.37(3)	—
Черт. 105	16	0.16	0.54(3)	2.14(3)	4.51(3)	—
Черт. 110	8	—	0.27(3)	1.05(3)	2.40(3)	4.3(3)
Черт. 105	5	—	0.16(2)	0.80(2)	1.96(2)	3.4(2)
Черт. 106[1]	2.5	—	0.13(2)	0.50(2)	1.05(2)	1.83(2)
Черт. 109	2	-	0.10	0.35(3)	0.70(3)	1.2(3)
Черт. 109	1.5		0.06(2)	0.26(2)	0.58(2)	1.03(2)
Черт. 109	1	—	0.03(2)	0.13(2)	0.32(2)	0.59(2)

[1] Из данных 106-го чертежа взяты только те, которые относятся к доскам, имеющим острый или округленный нос или корму, как и для досок другой длины. При срезанной корме (черт. 104 *A*, *B*) сопротивление гораздо больше.

данные исправлены на сопротивление воздуха и т. п. Качество подлинных чертежей Фроуда и их размеры дают уверенность только в десятых фунта, а за сотые нельзя отвечать, по крайней мере для досок длиною в 50—55 фут.

Эта таблица (стр. 361) в сущности не отличается от диаграммы черт. 108—не чем иным кроме того, что она включает опыты с гладкими досками не только 1-го, но 2-го отчета Фроуда (приложения 6 и 7) и сверх того она по возможности прямо выражает *опытные данные* Фроуда, исправленные в отношении сопротивления воздуха, а не выражает, как черт. 108, *выводы* Фроуда. Чтобы удобнее было проследить за дальнейшими расчетами, я интерполировал [1] полученные средние числа и нашел следующие величины, которые, в сущности, представляют просто свод прямых результатов наблюдений Фроуда над гладкими досками. [2]

Длина доски футы	Поверхность, кв. футы	В минуту		
		$v = 200'$	$v = 400'$	$v = 600'$
50	50	1.65 (4)	5.91 (4)	12.48 (5)
20	20	0.69 (7)	2.58 (7)	5.48 (7)
7	7	0.23 (5)	0.97 (5)	2.27 (5)
2	2	0.09 (7)	0.34 (9)	0.72 (9)

Из этого свода средних опытных данных Фроуда становится очевидным, что как первое приближение можно допустить, с одной стороны, что трение гладких поверхностей, после некоторой их длины, постоянно или пропорционально длине и, с другой, что мера (коэффициент) этой пропорциональности, в свою

[1] Лучше сказать, только регулировал данные первой таблицы. Напр. из данных для 28, 20 и 16′ длины найдено регулированное данное для 20′, пользуясь наблюдениями для длины 50′ и 8′ с 5′. Напр. для 50′ длины $v = 200'$, $r = 1.65$, для той же скорости при длине средней между 8 и 5, т. е. при длине $(3 \cdot 8 + 2 \cdot 5) : 5$ равной 6′.8 (так взято, потому что для 8′ есть 3 наблюдения, а для 5′ только 2), $r = 0.25$ в первом приближении, а потому можно считать, что на каждый фут (между 50 и 6′) длины сопротивление растет на $(1.65 - 0.25) : (50 - 6.8) = 0.032$ фунт., а потому для перехода от длины в 28′ к длине в 20′ должно вычесть из 1.01 (см. таблицу) величину, равную $0.032\,(28 - 20) = 0.256$, а потому, судя по числу для 28′, получаем для 20′ длины число $1.01 - 0.256 = 0.754$, его взять следует 1 раз для получения среднего, потому что взято оно из 1-го наблюденного числа. Так из данного для 16′ получено для 20′ число $0.54 + 0.128$. Среднее, регулированное для 20′, будет $= 0.754 + 3 \cdot 0.70 + 3 \cdot 0.668 = 7 \cdot 0.694$. Так найдены и все остальные числа таблицы из данных, относящихся до ближайших по размерам досок. Для обозначения того, какие данные взяты вместе в предшествующей таблице, соединены скобкою те числа, которые служили для одного вывода следующей таблицы.

[2] В этой таблице уже нет данных ни для $v = 100$, ни для $v = 800'$, потому что они не могли быть взяты с диаграмм для всех досок.

очередь, пропорциональна некоторой функции скорости, которая близка к v^2. А потому можно принять

$$r = v^2 f(v)\,(A + Bd),$$

где A и B постоянные, а $f(v)$ может быть, в первом приближении, принята за $1 - Cv$ или за $1 + \frac{D}{v}$. Придавая первое значение $f(v)$, получим следующее выражение:

$$r = v^2 (1 - 0.00032\, v)\, \frac{1 + 0.806d}{1\,000\,000} \quad \ldots \quad \text{(VII)}$$

Тогда вычисленные сопротивления суть:

	$v = 200$	$v = 400$	$v = 600$
$d = 50$	1.65	6.18	12.89
$d = 20$	0.68	2.55	5.32
$d = 7$	0.26	0.99	2.07

Сумма положительных разностей (между вычисленными и наблюденными сопротивлениями) равна 0.40, а сумма отрицательных $= 0.73$. Притом наибольшие разности получаются для доски в 50′ длиною, как и можно было ждать, потому что длина этой доски только в 5 раз с небольшим превосходит длину всего бассейна Фроуда. Если применить второе выражение для $f(v)$, т. е. считать, что сопротивление растет пропорционально биному $v^2 + Dv$, то получится для сопротивления гладких досок выражение:

$$r = (v^2 + 53\,v)\, \frac{0.75 + 0.645\,d}{1000000} \quad \ldots \quad \text{(VIII)}$$

Вычисляемые по этой формуле сопротивления суть:

	$v = 200$	$v = 400$	$v = 600$
$d = 50$	1.67	5.98	12.94
$d = 20$	0.69	2.48	5.35
$d = 7$	0.27	0.95	2.06
$d = 2$	0.09	0.37	0.79

Сумма положительных разностей для $d = 50$, 20 и 7 равна здесь 0.46, а отрицательных 0.59. И опять наибольшая отрицательная разность получилась для $d = 50'$ при $v = 600'$, как и можно было ожидать.

Отсюда очевидно, что из опытов Фроуда с довольно большою вероятностью можно вывести заключение, что *трение на гладких плоскостях, параллельных с направлением пути, постоянно* и с длиною неизменно, а именно на 1 кв. фут оно равно

$$f = \frac{d(r)}{d(d)}.$$

Если принять первую из наших формул и выразить скорости футами в секунду (а не в минуту, как было до сих пор), то трение на S кв. фут.:

$$f = Sv^2 (1 - 0.0192\, v)\, 0.00312 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (IX)$$

Приняв вторую формулу,

$$f = S (v^2\, 1.13 + v)\, 0.00205 = S (v^2 + 0.883\, v)\, 0.00232 . \quad . \quad . \quad (X)$$

При поверхности $S = 50$ для $v = 5$ и $= 10'$ первая дает $f = 3.53$ и 12.60 фунт., вторая $f = 3.41$ и 12.61 вместо тех 4.1 и 15.5 фунт., которые иным способом мы вывели из опытов Бофуа (стр. 355). Для $v = 10'$ в секунду ($= 600'$ в минуту) Фроуд дает при $d = 50'$ трение доски = 12.48.

Считаю не излишним заметить, что выражение (X), вообще говоря, не только лучше передает данные Фроуда, но, что гораздо важнее (ибо подлинных чисел Фроуда мы не знаем), более, чем формула (IX), отвечает природе явления по трем причинам: 1) Кулон, а за ним Стокс, Майер и др. (как увидим далее) считают, что при малых скоростях (гораздо меньших, чем у Фроуда) трение пропорционально первой степени скорости, а это и видно в нашей формуле (X), потому что значение члена v^2 будет уже меньше, чем значение члена с v, если скорости будут представлять правильные дроби, т. е. будут доли фута в секунду; 2) формула (IX) дает возможность думать противное, требует, чтобы при малых скоростях трение было пропорционально v^2, чего ждать никоим образом нельзя; 3) сверх того эта формула дает повод думать, что при возрастании скорости трение уменьшается и даже при некоторой скорости уничтожится. Правда, что наши формулы не имеют претензии выразить природный закон трения, они не больше, как интерполяционные формулы, но физическое значение формул необходимо иметь в виду, даже тогда, когда они применяются в пределах опыта (т. е. не служат для эксполирования), потому что иначе вывод формулы будет одним алгебраическим упражнением, не долженствующим иметь места при разборе явлений природы. Поэтому формулы (VIII) и (X) я считаю за более приличные делу, чем формулы (VII) и (IX). Главная цель, с которою, несмотря на недостаток подлинных чисел, я старался обработать данные Фроуда, состоит в том, чтобы проверить при помощи данных вывод Фроуда об изменении трения с длиною доски. Наши формулы показывают, что трение можно, даже по данным самого Фроуда, считать независящим от длины доски.

Результат Фроуда (трение переменно с длиною доски) зависит поэтому от того, что он не отличил сопротивления носа и кормы, наклонных к направлению пути, от трения или сопротивления площадей, параллельных пути. У носовой и кормовой частей

доски бока или стороны наклонены к направлению движения, а потому (как бы там ни объяснять сопротивление) представляют иную меру сопротивления при данной поверхности, чем те бока доски, которые параллельны с направлением пути, и при данной длине носа и кормы, их сопротивление очевидно должно быть больше, чем остальных частей такой же длины. [1] Взяв всю длину — носа, кормы и самой доски — и деля полученное сопротивление на всю эту длину, Фроуд должен был достичь того результата, который получил (сопротивление уменьшается с длиною), потому что сопротивление первых футов длины больше, чем следующих, а затем трение постоянно и пропорционально поверхности. [2]

Переходя от гладких досок к покрытым песком, Фроуд поступил опять чрезвычайно непоследовательно, приписав все получающееся сопротивление одному трению, не вычтя сопротивления носа и кормы, не приняв во внимание увеличения сечения доски и, главное, не обратив внимания на то, что неровности песчаной поверхности представляют совершенно иной род сопротивления, чем сплошная поверхность. Если бы называть трением все сопротивление (за вычетом носового и кормового), полученное в этих случаях, то для гладкой поверхности должно бы назвать сопротивление внутренним трением (развивающимся в жидкостях, разные слои которых имеют неодинаковую скорость), а сопротивление шероховатых поверхностей—суммою внутреннего и внешнего трения, как это общепринято при рассмотрении вопросов о движении жидкостей, напр. течения их по трубкам. Смешивать же внутреннее трение с внешним нельзя даже для решения практических вопросов, не только что для установки величин, выражающих меру трения. Внутреннее трение зависит только от качества жидкости, а внешнее от формы поверхности твердого тела, около которого происходит трение. Считая сопротивление поверхности, покрытой песком, за такое же, но изменен-

---

[1] Как это выходит по формуле, которая дает при $v = 600$ (или 10′ в секунду) для $d = 1$, $r = 0.55$, при $d = 2$, $r = 0.89$, а затем на каждый фут прибавляется 0.25 фунт. сопротивления.

[2] На стр. 357, в примечании, мы вывели из данных Фроуда, что при $v = 600'$ в минуту трение на 1 кв. фут на расстоянии от носа $= d$ равно $0.223 + \frac{0.647}{1+2d}$. Очевидно, что при очень большой длине доски трение на 1 кв. фут приближается к 0.223. По формуле (X), которая приведена нами выше и выведена из чисел Фроуда, независимо от его расчетов, оказывается, что при $v = 600'$ трение на каждый кв. фут доски $= 0.251$ фунт. Разность этих чисел (0.223 и 0.251) зависит по всей вероятности от того, что для доски длиною в 50′ сопротивление получено в опыте меньше, чем было в действительности (от неустановившегося движения), и число, относящееся сюда, уменьшило предел, к которому стремится трение на 1 кв. фут. Если бы стали известны подлинные числа опытов Фроуда, можно было бы все это решить с довольно большою уверенностью.

ное в величине трение, какое представляет и гладкая поверхность, Фроуд должен был бы считать за одно трение и тот случай, когда бы на плоскостях его досок помещены были шары, конусы и всякие другие тела, какой угодно формы и размеров. В этом случае всякий понимает, что сопротивление возрастет и всякий скажет, что возрастет от той же самой причины, от которой растет сопротивление при увеличении встречной поверхности и угла встречи. Ряд шаров, следующих за передовым шаром, представит сопротивление, пропорциональное числу шаров и гораздо большее, чем сопротивление параллельной с направлением движения поверхности, размерами по длине цепи шаров. У Памбура, в его „Traité théorique et pratique des machines locomotives" (2 éd., 1870, p. 134) и у Тибо, в его „Expériences sur la résistance de l'air" [1] есть опыты, относящиеся до сопротивления одинаковых тел, следующих друг за другом на известном близком расстоянии и расположенных по направлению движения. Оказывается, что каждое новое тело прибавляет меру сопротивления. И это не есть трение. Еще можно было бы думать так о вагонах, с которыми делал опыты Памбур, еще можно было бы, хотя с великою натяжкою, сказать, что прибавка вагонов потому прибавляет сопротивление воздуха, что длинные бока вагонов увеличивают трение,[2] но в опытах Тибо, сделанных для определения влияния парусов, загораживающих друг друга, ничего подобного нельзя и подумать, потому что он брал картонные или полотняные площадки и располагал их не вдоль, а поперек направления движения, а потому о трении боковых площадей нельзя и говорить, потому что они чрезвычайно малы. Известно также из практики водопроводов, что когда поверхность труб чиста, они дают гораздо больше воды, чем после того как на их стенки осядут песок, ржавчина и т. п. Сам Фроуд (Report Brit. Association, 1869) в Torquay исследовал в этом отношении водопровод и показал, что трубы диаметром в 10″ при нароете в $\frac{1''}{8}$ давали 317 галлонов воды, а когда прочистили (убедившись, что препятствие везде одинаково, не зависит от случайности засорения), те же трубы дали 655 галлонов. В то же время известно, что трубы чистые и гладкие из всякого материала дают одно количество воды, т. е. представляют одинаковое трение, не завися-

---

[1] Опыты этого последнего будут подробно разбираться в следующей главе.

[2] Памбур делал опыты так. Вагоны скатывались по рельсам, по наклонной местности, приобретали скорость и ею поднимались по наклону. Отдельные вагоны поднялись на подъем длиною от 3768 до 2064 фут., а поезд из 5 вагонов пробежал 5776 фут. Отсюда, зная вес и трение, если сопротивление 1-го вагона = = 70 (передняя площадь около этого числа кв. футов), то сопротивление следующих вагонов = 10, т. е. = $\frac{1}{7}$ всего прямого сопротивления.

щее от материала. Песчинки на досках Фроуда те же вагоны Памбура, те же прикрывающие друг друга паруса Тибо, тот же нарост водопроводных труб. Сопротивление второй, третьей и т. д. неравно сопротивлению первой песчинки, для каждой пусть $=\frac{1}{n}$ доли сопротивления единичной песчинки, а если так, то n друг за другом расположенных песчинок дадут сопротивление, равное одной отдельно и прямо стоящей песчинке, а mn песчинок, следующих друг за другом, дадут сопротивление в m раз бо́льшее, чем одна песчинка, и если длина будет расти, m будет тоже расти, а следовательно и сопротивление станет возрастать так, как растет прямое сопротивление m песчинок. Смысл этого толкования опытов Фроуда с песчаными поверхностями заставляет ждать для этих поверхностей даже иного закона изменения сопротивления со скоростью, чем для случая гладких поверхностей. Так и вышло в опытах Фроуда, потому что (приложение 7) для песчаных поверхностей вышло сопротивление пропорциональным квадрату скорости v^2, а для гладких поверхностей оно пропорционально $v^{1.9}$ [очень близкое вывел для трения и Бофуа, (стр. 346—347)]. Фроуд считает такое различие *аномалией* (приложение 7), а оно совершенно законно и ожидаемо. Вся аномалия в том одном, что Фроуд, следуя фрикционной системе понятий о сопротивлении, считает все сопротивление остроносых тел — лишь одним трением. Чтобы это утвердить, Фроуду следовало бы сделать определения с досками одной длины, но разной толщины, снабженными носом и кормою одних углов, и показать, что при этом получаются одни и те же величины сопротивления. Тогда бы можно было принять выводы Фроуда. А до тех пор надо думать, на основании всего поныне известного, что сопротивления при этом вышли бы различными, и если сечения обеих досок суть m и M, а боковые поверхности S, то сопротивления были бы: одно $r=kmv^n+fSv^{v1}$, а другое $R=kMv+fSv$, а неравные между собою и равные FSv^n. У Фроуда же взяты были, сколько можно было судить по его описаниям, все доски одной и той же толщины. Притом об этой толщине прямо указано, что (приложение 6) она $=\frac{3}{16}$ дюйм. или почти 4.1 мм. О толщине досок Фроуда можно судить еще по черт. 104, около которого в подлиннике стоят слова „full size", из чего имеем право заключить, что толщина досок была в действительности близка к 5 мм или 0.2 дюйм. Судя по тому, что высота досок была $=19$ дюйм. (приложение 6), оказывается, что окружность поперечного сечения досок была $2\cdot 19+2\cdot\frac{3}{16}=38''.37$, а потому мне кажется непонятным, почему Фроуд считает эту окружность $=3'2''$, как значится при его диаграммах plate IV и V (черт. 105 и 106). Не из-за

этого, можно сказать, мелочного упущения заговорил я здесь о размерах досок Фроуда, а для того, чтобы читатель вообразил затем такую тоненькую доску длиною в 50 фут., висящую в воде, закрепленную лишь в передней части и движущуюся со скоростью 800 фут. в минуту, или около 13 фут. в секунду, т. е. около 4 м (около 8 узлов или 14 верст в час). Каково было тогда положение доски? Оставалась ли ее ось параллельною поверхности воды и не получала ли вся доска колебательного, змееобразного движения? Сохраняла ли вообще доска в воде свою прямизну, т. е. не коробилась ли в продолжение опыта, не отвисал ли кроме того ее задний свободный конец? На эти вопросы нет положительных ответов в отчетах Фроуда. У него однако есть указание на то, что нижнее ребро доски было свинцовое, ради того, чтобы доски не всплывали и имели плотность воды. Но при этом, очевидно, рождается новый вопрос — как этот свинцовый киль или балласт прикреплялся к доске? Места прикрепления свинца к доске были ли за-подлицо с доскою? Отсутствие подробностей в отчетах Фроуда делает невозможным судить о величине этих и других побочных вышеисчисленных сопротивлений. Можно только, и то грубо, рассчесть сопротивление, соответствующее носу и корме, вместе с поперечным сечением досок Фроуда. Ширина их $=\frac{3''}{16}=0.0156'$, высота $19''=1.5833'$, следовательно, поперечное сечение $=0.0247$ кв. фут. Если бы тонкая пластинка этой площади двигалась со скоростью v фут. в секунду, то, приняв коэффициент k_1 1.30 (стр. 315), выведенный Понселе, ее сопротивление $=Sv^2$ 1.26 фунт. $=0.0311\,v^2$ фунт. (напр., при $v=10'$ в секунду $=600'$ в минуту, $r=3.11$ фунт.). При этом окружность доски $=3'2''$, а если бы она была $=1$ футу, как во всех предыдущих расчетах, то сечение доски было бы $\frac{0.0247}{3\,17}=$ $=0.0078$ кв. фут. и сопротивление соответственной тонкой пластинки было бы близко к $0.01\,v^2$, если скорости даны футами в секунду. Если формулу (VII) перевести для скоростей в секунду, то она получает вид:

$$r=v^2\,(1-0.0192\,v)\,(0.0036+0.00312\,d).^1$$

Для малых скоростей (до 6 фут.) можно принять приближенно $r=(0.0034+0.0028d)\,v^2$, а отсюда оказывается, что при длине $d=2.3$ фут. сопротивление[2] столь остроносого тела, как доски

---

[1] Напомним здесь, что множитель $v^2\,(1-av)$ или (v^2+av) может быть заменен множителем v^n, где n меньше двух. Так поступали Бофуа и Фроуд. Я ввел множитель $v^2\,(1-av)$ или v^2+av преимущественно для удобства расчета.

[2] Из данных стр. 350 видно, что при длине от 2.5 до 2 фут. при скорости 10′* в секунду (600′ в минуту) сопротивление близко к 0.9 фунт. для досок.

* В подлиннике опечатка „0′“ (*Прим. ред.*)

Фроуда (черт. 104, *CC*), равняется сопротивлению ($=0.01\,v^2$) нормальной пластинки, равной поперечному сечению доски. А отсюда ясно следует, что между весьма длинными телами не должно ждать тел наименьшего сопротивления.

Итак, если для гладких досок выразить трение, независимо от формы носа и кормы, и считать его фунтами на один кв. фут площади, параллельной направлению пути, то трение

$$\frac{d(r)}{d(d)} = f = v^2(1 - 0.019\,v)\,0.0031 \text{ или } = (1.13\,v^2 + v)\,0.00205.$$

Выражая же трение в килограммах на 1 кв. метр поверхности, параллельной пути, и считая скорости v метрами в секунду, получаем соответственно формуле (IX) выражение:

$$f = v^2(1 - 0.062\,v)\,0.163 \text{ кг на кв. метр.}$$

А соответственно (X) выражение:

$$f = (v^2 + 0.27\,v)\,0.122 \text{ кг на кв. метр} \ldots\ldots \text{(XI)}$$

В пределе от $v = 1$ до $v = 3$ м можно также считать трение приближенно $f = S\,0.14\,v^2$ кг.

Эта величина трения отличается от той, которую дают опыты Бофуа, но различие невелико (стр. 355), а принимая в расчет методы наблюдений, даже сходство результатов замечательно и служит к укреплению выводов, а потому для дальнейшего расчета мы удержим впоследствии нашу последнюю формулу (XI), отвечающую опытам Фроуда. Она выражает, это должно не забывать, трение *на плоскости, параллельные* с направлением движения. Какова величина трения при разном другом уклоне плоскостей — это мы, строго говоря, не знаем из имеющихся опытов о боковом или параллельном трении. Великий успех в учении о сопротивлении составляло уже одно введение понятия о существовании бокового трения в строго определяемой мере. Его нельзя было видеть, смотря на сопротивление в смысле ньютоновом как на результат инерции или удара, потому что на плоскостях, параллельных движению, нет ударов, инерция жидкости не имеет значения. Хотя Ньютон, Эйлер, и масса других, прежних исследователей допускали существование трения, но в расчет его не принимали, а оно оказалось значительным даже у параллельных плоскостей и его *должно считать* существующим и для всяких других площадей, ограничивающих

Фроуда при окружности = 1 футу. При той же скорости Бофуа дает для тел, ограниченных спереди нормальной плоскостью, сопротивление, близкое к 90 фунт. на 1 кв. фут, а как здесь сечение = 0.0078, то сопротивление плоскости сечения = 0.70 фунт., т. е. такое же, как для доски в 2′ длиною. Заметим, однако, что числа Бофуа ниже действительности.

движущееся тело. Бофуа (1796) и Кулон (1803) первые ясно ставят вопрос, делают прямые опыты. Опыт явно стал тогда во главе знания, относящегося до сопротивления. А затем Юнг (1807),[1] Нордмарк (1808), Тредгольт (1828), а в позднейшее время Скотт-Россель, Буржуа и многие другие вводят трение как элемент, всегда и явно влияющий на величину сопротивления, признают меру сопротивления за сумму из прямого сопротивления + трение. Если Дюшемен и Понселе в 40-х годах еще не принимают в расчет трения, то конечно лишь потому, что они опытов Бофуа не разбирали, а держались больше за Дю-Буа и за обычные теоретические представления о сопротивлении. Но рождается вопрос очевидный: каково же трение наклонной плоскости и сложной формы тела, такой, как корабль, т. е. как велика его роль в мере сопротивления разных форм? Ради краткости я избегаю изложения всех вышеисчисленных и других систем, которыми пытались помирить Ньютонову систему инерционного сопротивления с укреплявшимся учением о боковом трении. Так поступаю я потому прежде всего, что на русском языке имеется изложение этих учений в книге М. М. Окунева „Теория и практика кораблестроения", ч. I (1865) и в статьях С. А. Бурачка, помещенных в „Морском Сборнике" (1872, №№ 6, 7, 8, 9). Теория или, правильнее, прием расчета сопротивления, предложенный самим Бурачком, изложенный в том же журнале (1872, № 11) и раньше того упомянутый в „Морском Сборнике" 1841 г. (т. I, стр. 174, 394 и 522), в 1860 г. (апрель и май) и в 1861 г. (№№ 6 и 7), отвечает такой же средине — между прежнею, так сказать *инерционною*, системою и новейшими системами, которые можно назвать *фрикционными* системами сопротивления, исходящими в учении о сопротивлении из понятия о трении как главном источнике траты силы при движении корабля в жидкой среде. Выше я изложил исходные опыты фрикционных систем; в приложении 8 (и в „Морском Сборнике", 1877, № 4) приведены воззрения Фроуда, последователя волновой теории, составляющей первую ступень развития фрикционных систем. В „Морском Сборнике" г. Страннолюбский изложил принципы волновой теории по Ранкину. Тот же предмет передан в упомянутых выше статьях Окунева и Бурачка. Недавно И. П. Алымов в „Морском Сборнике" в последних книгах 1879 г. изложил свои мысли и проекты, во многом касающиеся той же системы. Все это освобождает меня от обязанности передавать здесь подробности не только переходных систем, но и той первой и, так сказать, крайней формы фрикционной теории, которая выразилась лучше всего у Ранкина. Не излагаю я подробностей этих систем еще и потому,

[1] Thom. Young. Course of Lectures on Natural Philosophy. T. II. Gehler's Physik. I. Wörterbuch, 1842, X, 1816.

что они, напр., теория Ранкина или „новая" теория Бурачка, малодоказательны, и хотя местами по своим приемам и соображениям очень изящны, но, конечно, неверны и не общи уже по одному тому, что неприложимы к таким простейшим формам, как шаровая, призматическая или цилиндрическая, а если прилажены с разными натяжками к расчету силы машины обычных форм кораблей, то или при помощи коэффициентов, найденных из опыта, или при допущениях, подобных увеличенной подводной поверхности, как у Ранкина или как у Бурачка, при допущении в расчет предположений, на опыт не опирающихся, о направлении скольжения частиц воды по бокам судна, и таких неясных и произвольных выкладок („Морской Сборник", № 11, 1872, стр. 35—41), которые не в обычае в строго научных исследованиях. У каждого крупного исследователя последнего времени, а тем более у Ранкина и Бурачка, есть частности и есть некоторые общие соображения, которые представляют много оригинального и поучительного, но нет ни полного решения задач сопротивления, нет ни своих опытных исследований, ни приложения своих выводов к простейшим и известным измерениям величины сопротивления, а вся проверка сводится на приложимость системы к определению сопротивления кораблей. А оно есть искомое, должно служить концом или выводом теории, а не быть началом учения о сопротивлении, потому что тут дело так сложно, что нельзя и думать разобрать его раньше, чем простейшие случаи. Ранкин прямо говорит, что в случае несовершенной формы его учение неприложимо даже к кораблю, а вовсе и не должно прилагаться к таким телам, как шар, цилиндр и т. п. Формулы же Бурачка, в том виде, как они им опубликованы в вышеупомянутых статьях, едва ли могут быть приложены к подобным телам.[1] При этом становится очевидным то положительно вредное влияние на

[1] Формула, данная Бурачком, принимает простейший вид в том случае, когда нос и корма одинаковы, мидель посредине. Тогда она превращается в следующую (приводим здесь величину сопротивления, т. е. силу, а не работу, как дает Бурачек):

$$R = \frac{\Delta M v^2}{2g} \sqrt{\alpha^2 (1 - \cos 0)^2 \left(rs + \frac{1}{2} \sin i\right)^2 + \beta^2 \sin^2 \theta \left(rs + \frac{1}{2} \sin c\right)^2} + \text{трение},$$

где Δ вес куб. меры жидкости, M площадь мидели, v скорость, g напряжение тяжести; $\alpha = \frac{\pi'}{\pi}$; $\beta = \frac{T'}{T}$: π' средняя мера (снятая по чертежу корабля, в статьях Бурачка даны все указания, необходимые для подобных съемок) падения или опускания водяных частиц, двигающихся *по следам*, перпендикулярным к шпангоутам, считая от точки носовой части корабля, до миделя; T' средняя мера отступления или движения в бок водяных следов, π и T падение и отступление главного следа, идущего от той точки, которая лежит на водяной поверхности, θ угол миделевого флортимберса (в миделе без киля) с диаметральною плоскостью; r отношение ширины к длине корабля, s отношение высоты или глубины подводной части корабля к его широте в миделе; i средний угол (снимается с вертикального чертежа корабля после обозначения следов) вертикального

успехи истинного знания, которое оказывает преждевременное стремление охватить сразу теориею прямые практические интересы. Сбор, регулирование и вывод эмпирических законов, касающихся таких природных явлений, имеющих большое практическое значение, как, напр., течение рек, полет птиц, падение дождя и т. п., неизбежно необходимы раньше появления теории этих явлений и могут, строго говоря, вести только к составлению

уклона следов и c средний же угол горизонтального уклона следов (снимается с горизонт-проекции корабля).

Очевидно, что и речи не может быть об уклоне вниз, или о падении следов (перпендикулярных к шпангоутам или поперечным сечениям) для тел призматических, подобных телам, испытанным Бофуа (лист 6 и 7), потому что все следы должны лежать по смыслу правил, данных Бурачком для их вычерчивания, в этом случае в горизонтальных плоскостях. Поэтому π и π' равны нулю. А между тем в статье Н. Н. Огранович (Морской Сборник, № 6, 1861, стр. 326), трактующей вопрос о формуле Бурачка, прямо даны значения α (отношение среднего падения к главному) и углы падения именно для тел Бофуа. Надо думать, как мне и сообщал сын профессора, Е. С. Бурачек, что при вычислении сопротивления тел, подобных вышеуказанным, применялись другие, чем публикованные С. А. Бурачком, формулы. Те же, которые известны, формулы этого автора не умели применить ни к шару, ни к призмам, ни к телам вращения ни я, ни многие из лиц, вникавших в учение нашего покойного специалиста. Сделаем однако попытку.

Возьмем для примера симметрическое тело Aa (черт. 77, лист 7): в средине куб, каждая сторона = 1 футу, нос и корма призмы (ось вертикальная), бока которых = 3 футам, следовательно, угол встречи = 9°35′38″, высота призмы = $= \sqrt{3^2 - \left(\frac{1}{2}\right)^2} = 2.958$, следовательно, вся длина тела = $2 \cdot 2.958 + 1 = 6.916$, ширина = 1, высота = 1, а потому $r = \frac{1}{6.916} = 0.169$; $s = 1$; угол $0 = 90°$; $i = 0$; c получится из того, что по длине 3′ угол встречи = 9°35′38″, а по длине $\frac{1}{2}$ фута (по кубу до миделя) угол встречи = 0, а потому: средний угол будет по всей длине до миделя = углу встречи, деленному на $3\frac{1}{2} = 8°13'24'' = c$. Так как все падения и все отступления (по крайней мере по бокам) одинаковы, то α и β, кажется, надо принять = 1, но здесь дело неясно, потому что для α получится выражение $\frac{0}{0}$ неопределенное, а что касается до углов отступления, то по дну и вершине тела Aa нет отступлений, но не знаем, судя по правилам Бурачка, принять ли это в расчет и как это сделать. Придав эти значения входящим величинам и зная, что в английских мерах $\Delta = 62.5$, $M = 1$, $g = 32.2$, для $v = 10$, получим R — трение $= \frac{62.5 \cdot (10)^2}{64.4} (0.169)^2 + (0.169 + \frac{1}{2} \sin 8°13'24'') =$ $= \frac{6250}{64.4} \cdot 0.294 = 28.5$ фунт. Бофуа дает для сопротивления тела Aa, за вычетом трения, при 10′ скорости, величину 20.37 фунт. Если уменьшить, судя по соображениям, высказанным выше, величину угла c, а также значение среднего угла отступления (тогда β будет меньше единицы), то величина R, конечно, меньше. Но в том здесь и дело, что сомнения в приложениях будут встречаться на каждом шагу, если принципы, на которых основан весь вывод правил, неясны по темноте и необщности изложения. Эта неясность, а затем приложимость к опытам Бофуа, о которой говорит и г. Огранович, заставляли и меня, как и многих других, предполагать в теории Бурачка нечто совершенно новое и

гипотез, более или менее достойных опытной проверки. Истинный путь, ведущий длинным, но зато верным способом к теоретическому пониманию сложных явлений, состоит в опыте и измерении отдельных частностей сложного явления. В опыте устраняются побочные, усложняющие обстоятельства, а измерения, производимые при опытах, составляют главную возможность проверки

успешное. Долго я, признаюсь, старался объяснить себе многие частности теории Бурачка, долго предполагал, что он попал на истинный путь. Но мало-помалу, разбирая разные стороны дела, я пришел к тому заключению, что теория С. А. Бурачка лишена основательности.

Первое сомнение во мне возбудило следующее обстоятельство. Сам Бурачек и г. Огранович доказывают справедливость новой формулы сопротивления приложимостью ее к объяснению чисел, полученных для разных тел в определениях Бофуа. Допустим это на слово. Оказывается затем, что данные Бофуа не согласны с выводами других наблюдений, как будет показано в следующей главе. Так, например, для шара, сечение которого равно 1 кв. м, Бофуа дает сопротивление около 19 кг, при скорости = 1 м, а все другие исследования показывают, что тогда сопротивление близко к 30 кг. Следовательно, согласие формул Бурачка с числами Бофуа есть несогласие с природою, доказывает неверность формул Бурачка.

Это зародило сомнение. Затем ему нашлись подтверждения.

Главными доказательствами сомнительности выводов С. А. Бурачка служили для меня следующие три: 1) В „Морском Сборнике" № 5, 1860 С. А. Бурачек прилагает свою формулу для расчета сопротивления фрегата „Генерал-Адмирал" и находит по чертежу, что без трения для придания скорости 10 и 12 узлов нужно 809 и 1398 л. с., с трением же около 860 и 1480 л. с. для преодоления сопротивления. Индикаторную силу паровой машины в действительности Бурачек указывает (стр. 96) равною 1018 и соответственную среднюю скорость 10 узлов. Затем он пишет далее (стр. 97): „Следовательно формулы и на этот раз в совершенном согласии с действительностью"... А я утверждаю, что приведенный пример (если показание индикаторной силы дано верно, а к этой цифре очевидно отнесено слово „действительность") прямо доказывает полную неприменимость формулы Бурачка к действительности, потому что трата силы машины двоякая: около половины на потерю в работе пароходного винта, трения механизма и т. п. и около половины, но никак не более $\frac{2}{3}$, на борьбу с сопротивлением и трением корабля о воду (что одно и рассчитывал Бурачек), а потому, не принимая в расчет первой траты, получающееся согласие чисел указывает грубую неверность формулы Бурачка для расчета сопротивления. 2) С 1847 г. („Морской Сборник" т. I, 1848 и № 11, 1872, стр. 46) С. А. Бурачек излагал морякам устно свое учение, в 1872 г. изложил его печатно, а и поныне ни из статьи, ни из бесед со многими учениками Бурачка, ни мне, ни кому-либо из моих знакомых не удалось уловить истинные основания всего учения Бурачка. Красивы и ясны лишь самые общие и бездоказательные предположения о движении следов воды по бокам корабля, понятны затем, неизвестно как выведенные, практические правила вычисления сопротивления по указанным формулам; все прочее, что необходимо для убедительности, не приведено, а потому в результате формулы С. А. Бурачка имеют характер приспособления к малоточным опытам Бофуа и к практике кораблестроения, а не того приверженного к чистой истине искательства, которое всегда найдет возможность в слове и статье выразиться с должною полнотою, особенно после многих лет выработки. 3) С. А. Бурачек („Морской сборник", № 11, 1872) весьма изящно развивает ту мысль, что при движении корабля раздвигаемые носом частицы воды давят на соседние, те на следующие и так далее до пространства, остающегося от убегающей кормы,

и гипотез, и потом теорий. Когда дело идет о явлениях природы или касается таких областей чистого знания, которые интересуют только немногих, избранных приверженцев неприкладного, абстрактного знания, тогда сочинение теории, даже для мало изученной области явлений, не только не приносит вреда, даже желательно и полезно, потому что образует партии, друг перед

тут и кончается передача давлений. Она совершается, по мнению автора, основанному на представлении о шарах водяных частиц, как бы по круговым сифонам, идущим с носа к корме и имеющим центры на поверхности миделя. Отсюда следствие, кажется, согласное с природою дела, что мидель должен быть посредине длины, если желают иметь малое соприкосновение. Отсюда же на стр. 28 выводится как следствие: „наименьший предел ширины канала, безвредный для сопротивления (известно, что в узких каналах сопротивление больше, чем в открытой и глубокой воде), определится радиусом от центра до начала крайнего носового сифона". „Назовем b полуширину, l полудлину корабля, найдем полуширину канала, безвредную для сопротивления $= b + \sqrt{b^2 + l^2}$". Этот вывод из основных положений не только прост и ясен, но и легко допускает опытную проверку. Для изучения сопротивлений М. Л. Гроссман и я произвели с шарами разных плотностей и диаметров в разных жидкостях и в сосудах разного диаметра ряд определений времени падения. Опыты эти в свое время будут подробно описаны. Теперь же я приведу лишь тот несомненный результат, в котором каждый легко может вновь убедиться, что времени падения шаров явно (или легко заметно) больше, чем в широком сосуде уже тогда, когда диаметр сосуда в 3, даже в 5 раз превосходит диаметр шара. Следовательно, выражаясь языком С. А. Бурачка, вред для сопротивления ощутителен даже при полуширине канала, превосходящей четверной радиус шара, а по гипотезам и формуле С. А. Бурачка наибольший предел вредной полушироты канала для достижения шара, коего радиус $= r$, должен быть $= r + \sqrt{r^2 + r^2} = 2.41\, r$. Так как при полушироте в 3 r или даже в 4 r замедление или „вред" сопротивлению еще ясно ощутителен, то гипотеза С. А. Бурачка о движении воды по кругообразным сифонам неверна. А эта гипотеза положена в основание всей теории автора, а потому становится очевидным, что один, весьма легко производимый, опыт давно бы мог убедить С. А. Бурачка в неверности его гипотез (и он их постарался бы заменить более подходящими), если бы у него было стремление достичь истины теми путями, которыми она действительно достигается. Убеждение в существовании возмущения, производимого движущимся шаром в жидкости на расстоянии, в 3—4 и более раз превышающем радиус шара, можно получить, не только измеряя времена падения в сосудах разного диаметра, но и в одном большом сосуде, если поместить в нем легко подвижный предмет (напр. для воды восковой шарик на тонком волокне). Он шевелится при проходе падающего шара, если находится от него на расстоянии, в 3—4 и даже 5 раз превышающем радиус падающего шара, как показали М. Л. Гроссману и мне прямые наблюдения. Должно заметить еще, что Дюшемен в 40-х годах вывел из опытов, что только на расстоянии, в 4 раза превышающем ширину движущегося тела жидкость остается неподвижною и что в канале диаметром в 4 раза противу движущегося тела жидкость при движении приходит в возмущение.

На основании трех указанных причин я не передаю в этой книге ни изложения общих соображений автора, ни частностей критики „новой русской теории сопротивления", принадлежащей С. А. Бурачку, но с охотою услышу голоса лиц, которые хотели бы толково изложить защиту мнений почтенного автора „русской теории", симпатичной мне не по названию и не по приемам развития, а по искрам правдивости, блестящим в ней среди общего мрака современных теоретических суждений о сопротивлении жидкостей.

другом стремящиеся оправдать или опровергнуть чересчур рано явившееся обобщение. Таких примеров много во всех областях точных знаний. Но когда дело касается не просто и прямо одного чистого и свободного знания, а живой и значительной практической деятельности (каково, напр., морское и кораблестроительное дело), находящейся в руках людей, долженствующих обладать практическим и теоретическим запасом знаний, тогда преждевременное составление теорий часто приносит вред и от него должны воздерживаться те, кто понимает современные условия. Это потому, что готовую теорию легко и охотно принимают в практике (если рутина не царствует), применяют к делу и достигают только плачевных и напрасных трат, да убеждения в теоретическом бессилии, в необходимости порознь вести дела жизни и практики от дел мысли и знания. Такова, по моему мнению, будет судьба всякого теоретического поползновения в деле кораблестроения и вообще сопротивления среды, пока не бросят торную дорогу аристотелевского и схоластически-тордого стремления охватить умом и анализом неведомую область сложного явления. В деле изучения природы — набег никогда не удается, потому что природа, во-первых, не враг, а во-вторых, не дремлет. Она раскрывает и отдает в распоряжение все свои силы, словом как бы покоряется — только тогда, когда за ней долго ухаживают, когда свои мысли и требования сообразуют с ее условиями, когда покоряются и ей самой, словом тогда, когда она стоит на равной ноге с обладателем или искателем, и лишь тогда, когда союз произошел на этих условиях, она становится доброй хозяйкой в практических делах, нет — так будет только их портить. Так развивались все те области знания, которые достигли наибольшей практической полезности: астрономические, механические, физические, химические. Оттого с высоты общих теоретических соображений в деле сопротивления должно спуститься до опыта и измерений, если желательно, чтобы было достигнуто совершенство в гипотезах и теориях предмета, а затем и в практических результатах, а самые опыты и измерения имеют свойство наводить на понимание сущности дела больше, чем рановременные и гордые попытки охватить сразу всю сущность предмета. Таков индуктивный способ знания. По этой причине во всей второй главе я почти ограничиваюсь описанием опытов и измерений, касающихся сопротивления, и только скрепляю внешним образом отдельные числа и наблюдения некоторыми соображениями и расчетами, так сказать, ради того, чтобы сухая ложка опытного знания легче принималась читателем. Как ни шатки иногда опытные сведения, касающиеся сопротивления, все же они стоят много тверже теоретических и обобщающих знаний этого предмета. Для убеждения читателей в последнем я считаю полезным в 5-м приложении к этой книге привести

перевод доклада, сделанного по инициативе правительства в 1869 г. Британской ассоциации для успеха знаний особым комитетом, в котором участвовали лучшие английские специалисты (между прочим Ранкин и Фроуд), и касающегося современного для того времени состояния знаний о сопротивлении корабля. С тех пор эти знания не подвинулись. Пусть же читатель услышит от компетентнейших лиц изложение того бесформенного и почти бесполезного состояния знаний, до которого дошли в деле сопротивления, отдаваясь сперва Ньютону, а потом ограничиваясь кораблем, служа то богу, то маммоне, и почти пренебрегая тем индуктивным путем, который привел другие области нового знания к их сравнительному совершенству, а затем и к практической приложимости. Ради той же цели, т. е. убеждения в отсутствии какой-либо строгости в теоретическом знании сопротивления, в приложениях 1-м, 2-м и 3-м приведены прежние системы, стремившиеся охватить задачи сопротивления, а в приложениях 8-м и следующих — новейшие попытки этого же рода. Сопоставляя их и прибавляя сюда теорию Бурачка, получим громкий, но далеко не складный концерт, явно показывающий, что снуются люди проникнуть в тайны сопротивления, но так толкают друг друга, что мешают и сами себе и спокойному, хотя и верному, ходу индуктивного знания. В этой путанице нельзя пробираться без столкновения; но пусть меня толкают, я постараюсь, с своей стороны, никого не задевая, итти полегоньку, руководствуясь светом опытного приема знаний, а потому и обращаюсь прежде всего за указанием к измерениям сопротивлений. Этому предмету посвящается вся следующая глава. Однако, прежде чем приступить к этому предмету, считаю необходимым, хотя вкратце, уяснить некоторые стороны предмета, близко соприкасающиеся с общим состоянием вопроса о сопротивлении, потому что эта первая глава и назначена для ознакомления с этими общими сторонами занимающего нас дела. При этом я ограничиваюсь такими частями учения о сопротивлении, которые или не развиты, или вовсе упущены в вышеуказанных русских статьях, имеющих в виду почти исключительно практику корабля.

В направлении учения о сопротивлении среды за последнее время, по моему мнению, важнейшую особенность составляет изучение явлений, сопровождающих движение тел в среде или совершающихся в связи с самым движением. Знакомство с трением открыло глаза, направило исследователей. Но и здесь надо отличить существенное, общее — от частного и касающегося лишь до движения плавающих тел, особенно до кораблей. Так, в изучении всех частностей сопротивления корабля, конечно, имеет большое значение точное знакомство с волнами, сопровождающими корабль и образующимися на поверхности воды; можно даже допустить со Скотт-Росселем, что для разыскания

наивыгоднейшей формы корабля это существенно, но для всей теории сопротивления полное исследование волн имеет лишь побочное и отдаленное значение, потому что при движении тела, совершенно погруженного в жидкость, это явление должно измениться. Иное дело — изучение движения воды около носа и кормы корабля, сделанное тем же Скотт-Росселем, потому что во всяком случае, воде ли, или иной какой жидкости нужно же куда-нибудь деваться, когда на данное место вступает движущееся тело и ей надо откуда-то притти в то пространство, которое остается за кормою корабля. Каковы направления раздающихся частиц жидкости или, как говорят,[1] струй, происходящих при движении тела в среде? Каковы отношения скоростей в этих струях к скорости движущегося тела? Как эти скорости изменяются в том канале или в том пространстве среды, которое занято возмущенною от движения жидкостью? Каково отношение ширины этого канала к поперечному сечению движущегося тела? Изменяется ли это отношение с переменою скоростей и с другими условиями (переменою среды, миделя, температуры, форм тела и т. п.)? Словом, каков механизм перемещения жидкости? Это перемещение видимо, ясно понимаемо, но каково оно — до того и дела не было тому абстрактному отношению к вопросам сопротивления, какого держались первые исследователи этого вопроса. Им не интересовались и тогда, когда просто проверяли ту или другую теорию. Для иных или все решается силою мышления, или сводится на простую практику судоходства или морской архитектуры. А после того как славнейшие мыслители — Ньютон, Эйлер, Бернулли и Д'Аламбер, отказались или сами признали свое бессилие в понимании еще не изученного сопротивления, когда Дю-Бюа, Кулон, Бофуа открыли новые горизонты для обсуждения вопросов, сюда относящихся, — невольно, силою вещей, пришлось прямо адресоваться к природе и разумно спрашивать у ней самой ответа на вопросы, касающиеся механизма сопротивления, чтобы мысль и основная гипотеза анализа мирились с природою дела. Но те вопросы до сих пор задавались еще редко, так сказать робко, и ответы потому получались неясные. Только стало очевидным, что без ответа на те вопросы придется блуждать в полумраке, который еще и поныне царствует в учении о сопротивлении среды. Постараюсь, однако, познакомить читателя с важнейшими из тех наблюдений, сюда относящихся, которые необходимы для понимания новейших теорий сопротивления, хотя последние обыкновенно (Скотт-Россель, Ранкин, Бурачек) и касаются лишь специально кораблей и избегают прямого отношения ко всем случаям сопротивления.

---

[1] Конечно, имея в виду, что корабль идет, так сказать, мимо воды, а не вода мимо корабля. Струя здесь только слово, которое заменить нельзя.

Перед площадкой, лодкой и т. п. телами, движущимися на поверхности воды, замечается возвышение воды, а за ними углубление. Они изменились в опытах французских академиков (стр. 317). Так, например, для тела (№ 1), изображенного (горизонтальный разрез) на листе 2, черт. 17, получены следующие возвышения: a—посредине передней площадки (remou centrale) и b у ее краев (remou laterale):

Число секунд на	$20' = 8.54$	7.95	7.42	6.75	$6.38 = t$	
Возвышение впереди	$a = 21$	23	26	34	36	линий
Возвышение сбоку	$b = 15$	18	19	26	29	„
Сопротивление	$r = 93$	108.5	124	155	170.5	унций

Выражая скорость футами $\left(v = \frac{20}{t}\right)$, можно видеть, что высоты в середине, т. е. a, возрастают пропорционально квадрату скорости, а именно $\frac{v^2}{a}$ или $\frac{400}{t^2a}$, а следовательно, и t^0a—есть постоянная величина, а именно величина произведения at^2 в действительности получается = 1531; 1454; 1432; 1549; 1465; среднее 1486. Следовательно высота поднятия изменяется, как сопротивления (по закону v^2), и действительно частное из r на a почти постоянно (= 4.4, 4.7, 4.8, 4.6, 4.7). Очевидно поэтому, что поднятие воды у передней нормальной поверхности двигающегося тела отвечает вполне тому поднятию воды в трубке Пито (т. е. зависит лишь от скорости), которое наблюдал Дю-Бюа. Скотт-Россель, сам делавший подобные наблюдения, принимает, в круглых числах, что в морской воде, при скорости 8 англ. фут. в секунду, поднятие воды перед плоским и нормальным носом = 1 футу, а затем эта высота a растет пропорционально квадрату скорости, следовательно, вообще $a = \frac{v^2}{64}$, [1] а сопротивление на каждый кв. фут плоской и нормальной поверхности Россель, на основании прежних наблюдений принимает равным 1 англ. фунту при $v = 1$, следовательно, вообще $R = v^2$, если R есть сопротивление на 1 кв. фут в англ. футах и v выражено в футах.

---

[1] Поэтому, вообще, если высоту поднятия a и скорость v выразить в англ. футах, то $\frac{v^2}{a} = 64$. Так как 1 франц. фут относится 1 англ. футу = 324.8:304.8, то 20 франц. футов = 21.3 фут. англ. Следовательно, в предшествующих французских опытах $v_1 = \frac{21.3}{t^2}$, а так как в одном англ. футе 135 франц. линий, то $a_1 = \frac{a}{135}$, а потому из французских опытов $\frac{v_1^2}{a_1} = \frac{(21.3)^2\ 135}{t^2a} = 41.2$, так как $t^2a = 1488$; полученное число отличается от Скотт-Росселевского. Так как высота h, отвечающая скорости в свободном падении тел, равна $\frac{v^2}{2g}$, а $g = 32$ англ. фут., то очевидно, что Россель принимает высоту поднятия воды равною высоте соответствующей скорости.

Когда передняя или носовая часть движущегося по воде тела представляет форму вертикального клина или двугранного угла, то и тогда около передней оконечности вода поднимается.[1] Французские академики наблюдали и меряли это поднятие. Например, для того же тела, изображенного на черт. 17, о котором шла речь выше, наблюдались следующие поднятия, когда тело двигалось вперед клином, а не плоскою поверхностью (тогда руль DH и поддерживающая его рамка $CEFG$ были перенесены на сторону AB, в этом виде оно означено в отчетах об опытах № 7).

Число секунд на	$20' =$	7.94	5.50	5.25	5.00	4.56	4.45
Возвышение в средине	$a =$	24	29	33	36	38	39
Возвышение сбоку	$b =$	0	0	0	0	4	6
Сопротивление, унций	$=$	77.5	93	108.5	124	155	186

Для соответственных скоростей здесь поднятие меньше, чем при плоском носе. Когда было взято тело, горизонтальный разрез которого изображен на 2-м листе, черт. 16, то к нему приставлялись носовые части разной степени остроконечности. Когда высота DQ была $=30''$ при ширине $AB=24''$, тогда (тело это названо № 12, опыты 114—120) получены следующие числа:

Число секунд на	$20' =$	7.25	6.80	6,43	6.10	5.56	5.12
Возвышение в средине	$a =$	21	24	29	33	38	45
Возвышение сбоку	$b =$	4	0	—4	—6	—	—
Сопротивление унций	$=$	93	108.5	124	155	186	217

При соответственных скоростях здесь поднятие меньше, чем для тела (№1) с плоскостью впереди, но больше, чем у вышеприведенного примера (№ 7). Это объясняется тем, что здесь ширина $=2'$, а там $1'$. Видно также, что вода сбегает по клинообразному носу легче, чем по плоскому.

Скотт-Россель основал на явкении поднятия воды перед носом движущегося по воде тела целую теорию сопротивления. Хотя она совершенно односторонняя, потому что к погруженному телу неприложима, а опыт показал, что сопротивление плавающего и погруженного тела почти одно и тоже (значит поднятие играет роль второстепенную в определении величины сопротивления), но однако мы считаем полезным дать о ней понятие, тем более, что и раньше, Росселя — испанец Дон-Жуан — исходил для составления теории сопротивления от явления поднятия воды перед носом корабля и опускания воды за кормою. По-

[1] Надо думать, что и все тело поднимается носом вверх, кормою вниз. Оттого, вероятно, в числах наблюдателей встречаются значительные различия.

лезно изложить мнение Скотт-Росселя сверх того не только потому, что он еще и поныне большой авторитет кораблестроения, начинатель господствующей ныне школы практиков, но еще и потому, что он один из тех, кто обратил внимание на многие побочные явления, сопровождающие движения тел по воде, и воспользовался ими для теории сопротивления и кораблестроения. Хотя его приемы основаны на правильном начале, и по возможности согласны с действительностью, тем не менее у него видна в каждом отдельном случае несомненная поспешность заключения от немногого или малоизвестного ко многому неизвестному, как это станет очевидным из тех соображений, какими переходит Скотт-Россель от поднятия воды перед носом движущегося тела к определению его сопротивления. Россель рассуждает примерно следующим образом.

Когда движется вперед нормальная плоскость и перед нею поднимается вода, то она имеет перед собою пространство в 180°, куда может сливаться поднявшаяся жидкость. Если движется клинообразное тело с вертикальным ребром и с наклонностью площадей 2α (где α угол встречи воды с плоскостью носа), притом так, что направление пути делит угол призмы пополам, то для поднимающейся воды остается свободное пространство для сливания этой воды, равное $360° - 2\alpha$. Далее Россель считает сопротивление обратно пропорциональным квадрату угла остающегося свободного пространства. Если назовем сопротивление нормальной площади через R, то сопротивление r клина при угле встречи α будет в отношении:

$$R : r = (360 - 2\alpha)^2 : (360 - 180)^2,$$

откуда следует, что относительное сопротивление призмы при угле встречи α (угол призмы 2α):

$$\frac{r}{R} = \frac{(360 - 180)^2}{(360 - 2\alpha)^2} = \frac{90^2}{(180 - \alpha)^2} = \left(\frac{1}{2 - \frac{\alpha}{90}}\right)^2.$$

А потому при $\alpha = 60°$ и $\alpha = 30°$ сопротивления относятся (конечно, при том же миделе) к сопротивлению нормальной площади как 0.5625 и 0.3600 относятся к 1. Но мы выше (стр. 317) видели, что французские академики нашли именно это отношение равным 0.7710 : 0.4404 : 1. Тем не менее Россель ссылается именно на эти опыты (подлежащие сомнению в своих подробностях и численных выводах, как увидим далее) для подтверждения своих выводов, причем исходит из того, что берет для сравнения не прямо нормальную площадку, а клин, для которого $\alpha = 60°$. Действительно отношение сопротивлений для $\alpha = 60°$ и 30° по теории Росселя $= \frac{0.5625}{0.3600} = 1.56$, а по опыту $= \frac{0.7710}{0.4404} = 1.75$. Для $\alpha = 6°$ французские академики дают отно-

сительное сопротивление 0.3999; исходя из данного для 60°, получаем = 0.3671, исходя из данного для $\alpha = 30°$, получаем для $6° = 0.3272$. Таким образом сопротивление плоскогранных тел, подобных корабельным носам, может быть выражено, по мнению Скотт-Росселя, формулою

$$R = CM\left(\frac{90}{180 - \alpha}\right)^2 v^2, \quad \ldots\ldots\ldots \text{(XII)}$$

где C есть постоянный коэффициент, не зависящий ни от угла встречи α, ни от величины миделя M, ни от скорости v.[1] Заметим, что при этом нет и речи о трении. Идя далее в своем размышлении о сопротивлении, Скотт-Россель видит возможность достичь наименьшей траты на движение тела в воде, придавая носу такую форму, при которой частицы воды наиболее легко скатывались бы по сторонам, не производя при этом ни возвышения впереди тела, ни каких-либо толчков или ударов друг о друга, совершающихся при плоскогранной форме и ведущих тогда к излишней трате силы.

Очевидно, что для этой цели надо придать самой оконечности носа форму чрезвычайно острого клина, не производящего удара и постепенно расширяющегося, чтобы приобретаемая частицами скорость росла последовательно, т. е. сделать для того переход от прямогранного обвода к вогнутой кривой, постепенно переходящей затем к выпуклой. Последнее необходимо ради того, чтобы получить корабли с надлежащею вместимостью и дать возможность скользящим частицам постепенно потерять при переходе через мидель на корму всю приобретенную скорость. Такое рассуждение очень важно исторически не только потому, что послужило для введения в кораблестроение новых форм корабля, но и потому, что касается вопросов сопротивления со стороны того процесса передвижения частиц среды, который до тех пор почти оставлен был без всякого внимания. В этом, по моему мнению, главная заслуга исследований Скотт-Росселя, относящихся к тридцатым годам этого столетия. Хотя он направил свои соображения на практические задачи кораблестроения — в чем и достиг того, что должен быть сочтен за родоначальника того направления, которое ныне известно под именем *струйной* и *волновой теории* кораблестроения (а не сопротивления, которое и Эйлер, и Бернулли, и многие другие рассматривали в смысле струй, как видно в 3-м приложении), — тем не менее, прямо или кос-

[1] Уже из предшествующего видно, что утверждать это Россель не имел права, но все же его формула лучше дает сопротивление призм, чем пропорциональность $\sin\alpha$ (Борда) или $\sin^2\alpha$ (Ньютон и др.), особенно для малых углов. Потому то мы и привели вывод этой формулы.

венно Скотт-Россель повлиял на всю историю учения о сопротивлении, что я и постараюсь теперь вкратце показать, избегая тех подробностей, которые касаются лишь кораблестроения. Последнее изложено в указываемых выше русских источниках и относится прямо к специальному вопросу морского дела.

Чтобы узнать правильность своих рассуждений о способе движения водных частиц около носа корабля, Скотт-Россель построил три лодки одинаковой глубины, ширины и длины, считая от носа до миделя, двигал их по спокойной воде с одинаковою скоростью и наблюдал за стеклянными шариками, имеющими плотность, немного меньшую, чем вода, и брошенными на поверхность воды в том месте, где должны были проходить лодки с приобретенною скоростью. Когда нос лодки представлял выпуклые обводы обычных в кораблестроении параболических форм, то шарики ударялись о нос, отскакивали от него и, так сказать, сильно путались перед носом. Когда обводы были прямолинейны (т. е. нос представлял плоскогранный клин), замечалось то же явление, хотя в меньшем развитии, а когда двигалась третья лодка, у которой обводы сходились в конце вогнутыми дугами, переходящими постепенно к миделю в выпуклые кривые, тогда шарики, не отскакивая, двигались вдоль бортов лодки, и перед носом было наименьшее возвышение воды, а отсюда Россель заключил, что тогда и сопротивление было наименьшее, потому что не было излишней траты силы на сообщение напрасного движения шарикам, и они, как и частицы воды, получали лишь то движение по направлению, перпендикулярному к пути лодки, которое неизбежно нужно дать частицам, потому что они должны расступиться, чтобы пропустить лодку.[1]

---

[1] Опыты с движением стеклянных шариков, брошенных на воду, играли большую роль в истории кораблестроения. Считаю не лишним указать здесь путь, более легкий и удобный, потому что шарики трудно готовить. Если взять тяжелое нефтяное масло, употребляемое для смазки машин и ныне очень дешевое и всюду находящееся, да прибавить к нему еще хлороформа или другой тяжелой жидкости, то можно сделать жидкость любой плотности — чуть большей, чем вода, или едва меньшей. Насосом или просто шприцовкою такую жидкость легко разбрызгать на поверхность воды пред носом двигающегося тела. Окрашенные шарообразные капли укажут тогда те направления, какие свойственны раздвигающимся частицам, и, если изменять плотность масла, можно сделать видимым движение водяных частиц не только около поверхности воды, но и на глубине, что особенно интересно. Такое же наблюдение подводных путей частиц можно сделать, если с берега подвести под воду трубку, разбрызгивающую маслянистые всплывающие капли в момент прохода предмета по поверхности воды. Бросая на поверхность воды легко растворимые (тяжелые) краски (напр. синюю анилиновую краску, как это делал для одного опыта К. Д. Краевич), можно также сделать поучительные наблюдения, потому что падающие в воде частицы красок оставляют за собою окрашенный след, некоторое время висящий в жидкости. Еще проще и без всякой особой подготовки можно получить некоторые сведения о путях раздвигающихся и насту-

Затем, проводя довольно произвольную аналогию между движением водяных частиц, расступающихся пред носом корабля, и качаньем маятника, Скотт-Россель доходит до формы корабельных обводов, представляющих наименьшее сопротивление. Это суть формы *волновой линии* или *синус-версоиды*. Чтобы построить ее, должно задаться полушириною корабля b (в миделе) и длиною носа l. Восставив на конце носа корабля (в горизонтальной плоскости или на поверхности водяного уровня) перпендикуляр длиною $= b$, опишем на нем как на диаметре круг и разделим его полуокружность на n (произвольное число) частей. Из полученных точек проведем линии, параллельные с длиною корабля. Затем полудлину корабля l разделим также на n частей, из них восставим перпендикуляры до пересечения с выше начерченными параллелями. Линия, соединяющая точки пересечения, будет волновая линия или синусверсоида или вогнуто-выпуклая кривая (с перегибом) водяных обводов носа для корабля наименьшего сопротивления, судя по мнению Скотт-Росселя. Он построил и корабль с подобными обводами — назвал его „Wave“ (Волна), сличил его сопротивление с сопротивлением кораблей такого же водоизмещения при равных скоростях и нашел для своего корабля меньшее сопротивление. Так укрепилась волновая теория постройки кораблей, основанная Скотт-Росселем, который затем дал и наивыгоднейшие длины носа, отвечающие скоростям, и указал, какую надо давать форму кормовым обводам корабля. Для нас все это, мало строгое по выводу и мало оправдавшееся по опыту, рассуждение имеет лишь тот смысл, что первый приступ к вопросам сопротивления со стороны механики невидимого процесса, происходящего при движении тела вперед, уже послужил к прямым практическим целям; мы постараемся показать, что тот же прием затем быстро отразился на всей теории сопротивления. Сам Россель, давший вышеприведенную формулу (XII) для сопротивления плоскогранного, клинообразного носа, принимает,

---

пающих на корму водяных частиц, наблюдая движение лодки, или парохода, или, лучше, двигаемого тягою судна во время осеннего ледохода, потому что мелкие частицы плавающего льда совершенно сходны с легкими шариками Росселя и др. Осенью 1879 г. на Неве я наблюдал в это время за движением лодок и пароходов. Как общее явление замечено мною, что лед, раздвигаемый носом, около миделя спускается немного вниз и затем — что гораздо важнее — за двигающимся судном остается канал, свободный от льда, хотя бы судно шло по поверхности, сплошь покрытой кусками льда. Этот канал, повидимому, указывает на то, что в кормовую пустоту, остающуюся за двигающимся телом, поступают не поверхностные массы воды (они бы принесли с собою лед), а вода, наступающая снизу. Если я не ошибаюсь, обыкновенно мореходы-практики думают иначе. Вообще же в опыте и наблюдении надо искать ключ к задачам сопротивления, а только затем прилагать к скопленному запасу силу анализа, если не желают дискредитировать силу самого анализа. Это основное положение я не устану повторять в этой книге.

что для призматического (ось призмы вертикальна) носа, образованного волновою линиею, при полуширине b и длине l (носа), сопротивление выразится формулою:

$$R=CM\left(\frac{b}{l}\right)^2 v^2, \quad \ldots\ldots\ldots \text{(XIII)}$$

где C то же, что в предшествующей формуле, и при измерении английскими фунтами и футами $C=1$. Сличая обе формулы, видим, что для плоскогранного клинообразного носа в 90°, для которого $\alpha=45°$, по первой формуле $R=CMv^2 0.444$, а по второй $(l=1)\,R=CMv^2 1.000$, т. е. в 2.3 раз больше. Если $\alpha=30°$, то $b=\frac{1}{2}l$, а потому по формуле (XII) $R=CMv^2 0.36$, а по (XIII) $R=CMv^2 0.25$. Если возьмем сравнительно большие длины, какие бывают в кораблях, напр. $\frac{b}{l}=\frac{1}{8}$, то $\alpha=7°10'$, тогда по (XII) $R=CMv^2 0.27$, а по (XIII) $R=CMv^2 0.156$, а потому и выходит, что формула Росселя дает для волновых обводов большее сопротивление, чем для плоских (при одинаковой скорости, при том же отношении длины и ширины и при том же миделе), если отношение длины к ширине мало, а если велико, как у кораблей, то для волновых обводов сопротивление меньше, как это и есть в действительности. Не надо доказывать, а само собою здесь ясно, как приноравливает Россель все свое учение о сопротивлении к практике корабля. Чуть выцли из нее,— формулы уже дают результаты, ни на чем не основанные, ни на что не опирающиеся. Ту же самую приноровку к практике корабля видим и у многих других новейших исследователей сопротивления. Потому-то все попытки этого рода не имеют сами по себе научного значения, представляют грубый эмпиризм и освещают дело не ровным светом научных истин, а некоторым неверным блеском. Пойдем, однако, еще немного далее для того, чтобы видеть яснее и лучше тот ничем почти не стесненный произвол рассуждений, который господствует, когда принимаются за научное обобщение с одними прямыми практическими целями.

Сперва, рассматривая сопротивление клиньев, Россель берет все получающееся на опыте сопротивление, не выделяя из него трения. Переходя к практике кораблей, имеющих большую длину и следовательно большую подводную поверхность при данном поперечном (миделевом) сечении, Россель вводит теперь трение, признавая, что оно может представлять половину всего сопротивления, при значительных скоростях. Когда же в 50-х годах были устроены по волновой теории длинные корабли и их сопротивление оказалось не меньшим, чем у кораблей прежних форм, и бо́льшим, чем ожидалось по

формулам, тогда Бурн (Bourne), а затем и многие другие, особенно же Ранкин, стали склоняться к тому, что сопротивление кораблей волновой формы зависит главнейше лишь от трения. Так родилась от Ранкина *фрикционная теория* сопротивления корабля. Она изложена в 8-м приложении к этой книге, в популярном изложении Фроуда. Ее результаты приводятся во всех современных курсах и статьях, относящихся до кораблестроения. Сущность дела сводится на то, что Ранкин выражает все сопротивление (помимо того, которое зависит от волн и водоворотов) корабля произведением из коэффициента трения на квадрат скорости и на величину подводной поверхности корабля. Но так как скорость у наклонной элементарной поверхности Ранкин считает бо́льшею, чем скорость корабля, и изменчивою с наклонением элементарной площадки,[1] что и естественно, то в вычислении работы[2] сопротивления он и вводит куб этой переменной скорости. А именно: пусть скорость движения (скольжения) воды по элементу поверхности dS будет w, когда скорость корабля $= v$, то работа трения будет fw^3ds или fv^3q^3ds, если $q = \frac{w}{v}$, а так как сопротивление равно работе, деленной на скорость, то сопротивление элементарной площадки $= fv^3q^3ds$, где w или q есть переменная, зависящая от изменчивого уклона площадки. Очевидно, что сопротивление тела, напр. корабля, будет равно:

$$R = fv^2 \int q^3 ds.$$

Физическое значение этого интеграла есть некоторая площадь, если сопротивление трения выразить вообще произведением fv^2S, где S есть площадь, параллельная с направлением пути, и f—коэффициент трения. Оттуда происходит название этого интеграла—*приращенною подводною поверхностью* (augmented surface). Собственно здесь принята во внимание изменённая скорость, а не поверхность. Вот эту-то величину измененной поверх-

[1] Весьма курьезно, что Буржуа, в своем известном сочинении „Mémoire sur la résistance de l'eau" (par Bourgeois, Paris, стр. 19), разыскивает для определения трения на наклонную плоскость уменьшенную поверхность — Surface frottante reduite, а Ранкин для того же случая ищет увеличенную поверхность; оба идут во многом параллельно.

[2] Если сопротивление пропорционально квадрату скорости, то работа его, конечно, будет пропорциональна кубу скорости. Но для того расчета, который делает Ранкин, кажется мне, вовсе не следовало вводить понятия о работе, а следовало ограничиться самым сопротивлением, тогда q вошло бы не в кубе, а в квадрате, и результат вышел бы другой. Такова шаткость всех поныне существующих геометрических построений, касающихся до сопротивления, что ни сам Ранкин и никто из воспроизводивших его формулу (а ее везде воспроизводят, говоря о фрикционном учении) не обращают внимания на произвольность замены сопротивления — его работою, на замену v^2 — кубом скорости.

ности Ранкин и рассчитывает для тела призматического (ось призмы вертикальна) образованного волновыми сводами, такими, как у Росселя, и при высоте призмы h и при длине L находит ее равною $2\,Lh\,(1+4\sin^2\beta+\sin^4\beta)$, где β есть угол (наибольший), образуемый между направлением движения (осью корабля или продольною горизонтальною осью симметрии взятой призмы) и касательною к волновой линии в месте ее перегиба.[1] Разбивая площадями, параллельными с уровнем воды, корабль, построенный по системе Росселя, на призмы, легко найти приращенную поверхность подводной части корабля, которую означим чрез T. А из сопротивления находится и работа для преодоления трения такого корабля; если принять притом некоторый коэффициент полезной работы винта, то можно вывести и силу машины в лошадях; она очевидно $=Cv^6T$, где C есть постоянная величина. Ранкин[2] принимает ее $=0.00005$, если v выразить узлами, а T выразить англ. кв. футами.[3] Нечего и думать о проверке подобных общих выводов, потому что коэффициент трения поверхности корабля зависит от ее состояния: зарастет она ракушками или будет иметь болты железной обшивки, станет ржавая или останется чисто медною, — коэффициент трения будет меняться в два и даже три раза;[4] а затем коэффициент полезного действия у каждого винта, у каждой скорости свой, а эти и другие изменчивые величины входят в C, величина же T чистая гипотеза, — так что ничего и не остается для проверки. Как было шатко, так и после того все осталось шатко. Причина тому ясная. Рассчитывается Ранкином скорость скольжения воды по поверхности корабля, а ее, в действительности, не знают. А опытным путем ее можно было бы узнать, если бы хотели действительно искать просто сперва одной *правды*, а уж из нее выводить *истину* или закон, как следует делать, а не спешили

---

[1] Вывод этот дан в „Philosophical Transactions", т. 153, 1863, в приложении к статье Ранкина, на стр. 136, а в примечании на стр. 137 принято для f (коэффициент трения для крашеного железа) значение 0.0036. Тот же предмет элементарно развит в известном капитальном творении: Rankine. Shipbuilding theoretical and practical, 1866, p. 81 etc.

[2] Rankine. Shipbuilding theoretical and practical, p. 84.

[3] Это выражение показывает, что для придания скорости в 1 узел на каждые 20 000 кв. фут. приращенной подводной поверхности корабля потребна одна лошадиная сила.

[4] Вот пример от Буржуа, взятый им от Бурна: железный пароход „Мупх" после постройки шел при 150-сильной машине 8 узлов, а чрез три месяца пребывания в Темзе, когда поверхность покрылась осадком, шел только 7.8 узлов, развивая 165 сил. Это показывает (если допустить, что все изменение произошло только от поверхности, а не от машины или винта), что сопротивление возросло в 1.6 раз. *

* Опечатка или в числе узлов (надо 6.8 вместо 7.8) или в числе, указывающем увеличение сопротивления (1.16 вместо 1.6). (*Прим. ред.*)

бы сразу захватить истину одним набегом ума. Найти же скорость скольжения воды по бокам, конечно, возможно и, пожалуй, скорее и точнее, чем приращенную поверхность. Конечно, в ее расчете будет ошибка, допущение, геометрическое построение, только с отступлениями прилагающееся к действительности, как будет некоторая погрешность и в измерении, но дело не в том малом различии от действительности, которое всегда в опыте и измерении неизбежно, а в том, что разочтенная величина и в мере, и во всем смысле может быть неверна, а наблюденная будет справедлива, по крайней мере в крупных чертах. В самом деле, около поверхности судна скорость скольжения w воды можно считать или большею, или меньшею, чем скорость v самого корабля. Скольжение w по наклонной плоскости больше v скорости движения, если не признать слоя воды, прилипшего к стенкам корабля, и если, затем, считать, что при проходе пути v частица воды по наклонной поверхности должна пройти путь $w = \frac{v}{\cos\alpha}$, где α угол встречи. Но если держаться вместе с Дю-Бюа, Пуассоном, Дюшеменом, Стоксом и др. того, что около движущегося тела несется вместе с ним некоторая масса увлекаемой жидкости, составляющая как бы жидкий нос и жидкую корму, то в самой этой жидкости, прилегающей к движущемуся телу, надо допустить скорость, близкую к скорости тела, и окажется тогда, что скорость скольжения w около поверхности меньше, чем скорость тела v. Тогда надо допустить, идя по нормали к поверхности и начиная с нее, что в ближайших частицах воды скорость скольжения мала, потом растет, достигает где-то наибольшей, потом опять убавляется и постепенно переходит до нуля в том месте жидкости, на котором нет возмущения при движении. И что верно, и что вероятнее,—опыт решить может, измерение сделает очевидным, а одно умственное соображение и один расчет, основанный на допущении известного предположения,—просто-напросто не подвинет вопроса ни на шаг дальше.

Итак, Скотт-Россель начал с опытов, с приноровки формулы к измерениям французских академиков, с наблюдений. И это вносит в разработку сопротивления что-то новое, бросает некоторый свет. Кончил же он, а за ним и Ранкин, такими умственными построениями, которые так и остались непроверенными, да которые, надо признаться, и проверить как следует трудно, потому что все дело сведено на практику корабля и особенно на расчет силы машины, потребной для сообщения известной скорости донному кораблю, а для решения этого надо знать много такого, что вовсе не составляет прямой задачи сопротивления корабля, которую хотели решать: надо знать состояние поверхности, полезную работу винта и т. п., а потому и выхо-

дит, что проверки хода мыслей нет. Оттого нет убедительности во всем ходе умозаключений. Дается теория сопротивления корабля, когда он обладает известными формами, представляет своими обводами некоторую волновую (периодическую, синусоидальную, трохоидальную) кривую. Следовало бы, кажется, проверить вывод не над каким-либо грузовым кораблем, не в практике, где входит много постороннего, а просто над моделью, наконец, над пустым кораблем, определяя его сопротивление, в зависимости от скорости, при помощи динамометра. Один, хорошо обставленный, опыт подобного рода убеждал бы гораздо более, чем много примеров практики, где ни за одну цифру нельзя поручиться. Сверх того, ведь работа винта основана на той же силе сопротивления, противу которой борется корабль при движении. Если теория может охватить случай корабля, она должна охватить и случай винта, и только тогда она будет иметь действительно научное значение, а тогда и отдельный сложный опыт в практике данного парохода будет иметь ценность проверки всей теории. А приложить теорию одного чистого трения к реакционному сопротивлению пароходного винта, конечно, ныне вовсе нельзя; этого, само собою разумеется, не думает и Ранкин, а потому его воззрения, по моему мнению, не имеют другого интереса, кроме того, что в них с особою резкостью и впечатлительностью выражена та важная роль, которую играет трение в изучении сопротивления. Если искать начинателей подобного учения, то они несомненно явились раньше Ранкина и, сколько я знаю, Сен-Венану и Стоксу принадлежит почин во *фрикционном учении*, производящем все сопротивление от трения. Судя по статьям Сен-Венана, напечатанным в „Comptes rendus" Парижской Академии (т. 24, 1847, стр. 244), и в известном, хотя мало распространенном журнале „L'Institut" (1846, стр. 100), должно думать, что еще в 1834 г. он представил во Французскую Академию мемуар, в котором изложены начала фрикционной теории, отвечающей парадоксу, выставленному Д'Аламбером и Эйлером[1] и состоящему в том, что действие воды на движущееся тело сводится к нулю, если рассматривать и носовую, и кормовую части тела.[2] То же ныне в ином виде учат последователи струйной теории.[3] Можно это выразить проще всего так: если в жидкости движется шар, двойной конус или тому подобное геометрическое тело, корма которого равна носу, то оно тратит столько же силы на раздвигание жидкости своим носом, сколько приобретает от жидкости, падающей на корму.

---

[1] D Alambert. Opusc, V, 170, VII, 210. Euler. Nov. comm. acad. scientia Petropolitanae, V. II, 187. Обе эти цитаты взяты мною из „Fortcshnited Physik", 1846, pp. 67, 68.

[2] См. приложение 3.

[3] См. *приложение 8.*

а потому инерционное сопротивление=0. Это будет справедливо и для тела всякой другой формы, если представить некоторую идеальную жидкость, у которой нет другого взаимодействия между частицами, кроме передачи давления во все стороны одинаково. Иное дело с реальными жидкостями, обладающими сцеплением и вязкостью, а потому и внутренним трением. Движение их частиц, происходящее как от раздвигания носом, так и от стремления итти в пустоту, оставляемую кормою, передается соседним частицам, рассеивается в массе жидкости и производит неизбежную затрату работы, словом, производит сопротивление. Оно и выставляется С.-Венаном как результат внутреннего трения, которое само есть сила, проявляющаяся между частицами жидкости, когда некоторый их слой (прилипший к твердому движущему телу) движется и увлекает соседние, которые однако движутся медленнее, чем слой жидкости, приводящий их в движение. Некоторое количество движения, некоторая работа тратится при такой передаче, и в сумме эта трата производит сопротивление движущегося тела. Движение, конечно, не пропадает абсолютно, оно, как в обычном трении твердых тел, превращается в тепло. Вот, по моему мнению, сущность фрикционных теорий. Очевидно, что внутреннее трение будет поглощать еще больше силы и работы тогда, когда от совокупности двух, движущихся под разными углами, токов жидкости явятся вихри (вьюны, водовороты), как это случится яснее всего при движении угловатого или плоскогранного тела или тела с шероховатою поверхностью. В водопроводе произойдут такие вихри, например в таком месте, где будет или быстрое сужение или быстрое расширение канала. При этом на массу M потеря живой силы, по Бернулли и Дю-Бюа, будет $\frac{1}{2} M(V^2 - V_1^2)$, если V есть скорость до— и V_1 после изменения ширины канала. По Борда, величина эта $= \frac{1}{2} M(V - V_1)^2$ и Сен-Венан признает это последнее выражение согласным с действительностью. Сен-Венан в этом и многих других частях своего исследования прямо сравнивает сопротивление с течением по трубкам и каналам, как делают и все другие вслед за ним. Здесь неуместно было бы вдаваться в подробности учения о течении воды по трубкам, хотя оно по существу и смыслу современных учений о сопротивлении тесно связано с этим последним, но полезно заметить, что, хотя в учении о течении жидкости по трубкам, имеется уже масса отличных наблюдений и точных эмпирических выводов,[1] еще не настало даже для этого учения периода полной теоретической выра-

[1] Укажу для примера на работы Прони, Эйтильвейна, Дарси, Жирара Вейсбаха, Мейера, Харгена, Пуазеля, Грема и др.

ботки, чтобы можно было, без помощи особых, каждый раз новых, эмпирических коэффициентов, зная одно внутреннее трение жидкостей, строго решить все вопросы, сюда относящиеся, уже по одному тому, что есть скольжение и внешнее трение, ныне еще мало изученные. Дело совершенно ясно только для очень узких и длинных трубок благодаря тому, что Пуазель из опытов извлек закон движения в них жидкостей, а затем в более новое время Стокс (1847), Хагенбах,[1] Якобсон (1861) и многие другие связали этот закон с учением о внутреннем трении или о вязкости (Zähigkeit, viscosité) жидкостей, так что внутреннее трение жидкостей проще всего и определяется истечением жидкостей из капиллярных трубок.[2]

Лишь только от капиллярных трубок приходится переходить к трубкам значительных диаметров—влияние стенок уменьшается, скорость возрастает, дело изменяется, законность истечения становится более сложною, менее ясною (потому выводы разных исследователей разноречивы) и, главное, иною, чем для узких капиллярных трубок. Пусть дан сосуд, в котором вода стоит на высоте h, и в тонкой стенке дна круглое отверстие

---

[1] Hagenbach. Pogg. Annalen, T. 109.

[2] Литература этого предмета чрезвычайно обширна. Оно и понятно. Опыты этого рода производить можно в кабинете или в лаборатории, а теория истечения из узких труб возможна (потому что скорости малы) и интересна, так как касается вопросов гидродинамики, у которой, благодаря совокупному усилию экспериментаторов и геометров, есть уже твердые основные положения, допускающие подробное ознакомление с частностями, по крайней мере в простейших случаях. Главный толчек дал во всяком случае Poiseuille своими измерениями (Annales de chemie et physique VII, 1843; Mémoires des savants etrang., T. IX, 1849) и тем выводом, что количества истекающей жидкости пропор[циональны] разности давлений (что знал Жирар, 1816), четвертой степени диаметра и обратно пропорциональны длине трубки. Коэффициент этой пропорциональности находится в простой зависимости от коэффициента внутреннего трения, а именно: $\mu = \frac{\pi P r^4}{8 v l}$, где $\pi = 3.14\ldots$, P есть действующий при истечении перевес давления, выраженного весом (килограммы или, чаще, граммы на кв. метр, прямо в граммах, как у Хагенбаха, или в абсолютных массах, т. е. по разделении на g=9.8, как у Мейера, Стокса и большинства других), r радиус капиллярной трубки, v объем вытекающей в 1 секунду жидкости, равный объему w, вытекшему в t секунд, деленному на t, и l длина трубки. Так, напр., для воды в опытах (очень сходных с опытами Пуазеля) Шпрунга (A. Sprung, Experimentelle Untersuchungen über die Flussigkeitsreibung Salzlösungen. Dissertation, Leipzig. 1876) $P = 1.58$ м водяного столба, $r = 0.2312$ мм. $w = 0.02115$ м, $l = 0.3$ м, t при $0° = 640''$, при $20° = 366''$, при $40° = 244''$. Отсюда, по Хагенбаху, т. е. в граммах, вязкость μ при $0°$ — 0.182, при $20° = 0.102$. при $40° = 0.068$, а в граммах и абсолютных массах $\mu = 0.0141$; 0.010; 0 007 при 0,20 и 40°. Особенно много сделано за последнее время работ о внутреннем трении в газах, для которых закон истечения из капиллярных трубок в сущности такой же, как для капельных жидкостей. Грем (Phil. Trans. 1846. 1849), О. Мейер (Pogg. Ann. T. 117, 1866, p. 253), Максвель и др. сделали эту часть физических сведений о газах очень совершенною, показав, что замедления качания дисков и опыты в капиллярных трубках дают тот же результат.

диаметра d; тогда, по закону Торичелли, скорость истечения будет $= \sqrt{2gh}$, а следовательно, в 1″ вытечет объем $\frac{\pi d^2}{4}\sqrt{2gh}$. Если, при той же разности давления h на обоих концах трубки и при диаметре d, будет происходить истечение чрез горизонтальную капиллярную трубку длиною l, то в 1″ вытечет, по закону Пуазеля, объем $= k_1 \pi d^2 \cdot \frac{d^2 h}{l}$, где k_1 есть свой постоянный коэффициент, не зависящий ни от d, ни от h, ни от l, а только от природы жидкости и температуры. Если при том же перевесе h и при значительной длине l ширина горизонтальной трубки будет значительна, т. е. и d велико, то скорость истечения из нее, по Навье, Прони, Эйтильвейну и др. (отбрасывая члены, имеющие малое влияние на результат), равна $a\sqrt{2gh}\sqrt{\frac{d}{l}} + b$, а потому объем для 1″ времени будет равен $k^2 \frac{\pi d^2}{4}\sqrt{2gh}\sqrt{\frac{d}{l}} + k^3 d$, где k^2 и k^3 суть опять новые постоянные, находимые из опыта. Вейсбах для этого случая дает такое выражение количества, вытекающего в 1″:

$$\frac{\pi d^2}{4}\sqrt{2gh}\sqrt{\frac{d}{kl}},$$

где $\pi = 3.14...$, $g = 9.82...$, а коэффициент k трения, по обозначению Вейсбаха[1] (при метрической системе), изменяется со скоростью (выражаемой тем произведением корней, которое составляет множитель предшествующего выражения), а именно:

$$k = 0.01439 + \frac{0.0095}{\sqrt{v}},$$

при $v = 0.1$ м $k = 0.044$, при $v = 1$ м $k = 0.024$, при $v = 10$ м $k^2 = 0.017$.

Хаген, Гразгоф, Ранкин, Мейер, Дарси и почти каждый, кто занимался вопросами, касающимися водопроводов, дают опять свои формы выражениям, назначенным для определения скорости истечения воды по трубам водопроводов. В численном результате расчеты сходятся при средних, обычных скоростях и диаметрах, но общего, твердо принятого закона нет даже для случая прямой длинной трубки (не говоря уже об изгибах, расширениях и т. п.). Несомненно, однако, что в опытах, произведенных в тонких капиллярных трубках, замедляющая сила или трение оказалось почти пропорционально первой степени скорости, а в широких

[1] Для того, чтобы получить ту величину коэффициента трения, о которой далее и ранее идет речь, должно k Вейсбаха умножить на $\Delta = 1000$ и разделить на $8g$.

[2] В подлиннике v. (*Прим. ред.*)

трубках — почти квадрату скорости, и что в тех и других оно почти не зависит от материала стенок, если они гладки, и что оно зависит от разности давлений, но не от величины самого давления. Если бы обратить внимание на то, что при опытах в тонких трубках влияющие поверхности велики, а относительные скорости малы, а при широких трубках обыкновенно скорости велики, а относительные (к массе протекающей воды) поверхности малы, то должно думать, что все дело трения в трубках сведется к одному общему закону,[1] в котором при больших скоростях окажут влияние те члены, которые почти исчезают при малых, и обратно. Но до такого общего закона еще, повидимому, не скоро дойдут в гидродинамике, потому что здесь, подобно тому как в вопросе сопротивления, впадают в две крайности — или скорого теоретизирования, без достаточного запаса широких опытных данных,[2] или в прилаживание обобщений прямо к из-

[1] Мне кажутся особо настоятельными опыты в тонких трубках при больших давлениях и скоростях и сверх того при разных длинах; а в широких трубках при очень малых скоростях и при очень больших длинах, а также с разными другими жидкостями, а не с одною водою. Опыты с нефтепроводами уже имеются в Америке и дали уже замечательные и неожиданные результаты. Если опыт будет во главе — конечно, анализ подделается под его результат, и тогда покажется, что он и составляет всю сущность знания.

[2] О. Мейер в „Poggendorff's Annalen" (Jubelband, 1871, стр. 1) делал опыты с трубкою в 7 мм внутреннего отверстия, длиною в 3000 м и нашел следующие числа, причем давления h, выраженные у Мейера в атмосферах, считая в каждой 28 рейнских дюймов ртути, меряются здесь высотою столба воды в метрах. Длины трубки означены чрез l в метрах, объемы w даны для 1″ в куб. сантиметрах (миллионная доля куб. метра):

	$h = 9.9$	19.7	29.7	39.6	49.4
	$\sqrt{h} = 3.1$	4.4	5.6	6.3	7.0
$l =$ 250	$w = 10.4$	19.2	26.3	29.4	31.3
500	6.8	11.9	16.1	20.8	22.7
750	5.0	8.5	12.2	15.2	17.8
1500	2.9	5.3	7.5	9.4	10.9
3000	2.0	3.2	4.4	5.4	6.4

Очевидно, что здесь нет у вытекающих объемов w пропорциональности ни с давлением h (как у капиллярных трубок), ни с $\sqrt{h}$, как в широких трубках, ни с $\frac{1}{l}$, ни с $\frac{1}{\sqrt{l}}$ и что действует некоторый средний закон. Мейер признает для времен, выражающих истечение равных объемов, некоторый сложный закон

$$t = \frac{A}{\sqrt{h}} + B\frac{l}{h} + C\frac{l^2}{h^2},$$

где B есть пуазелевский коэффициент $\frac{8\mu w}{\pi r^4}$; но опыты Мейера, хотя очень интересны и достойны повторения, едва ли достаточно точны по условиям

вестным практическим потребностям — здесь к водопроводам. Недостаточная общность теоретических начал и недостаточность приемов математического анализа явлений трения видны из того уже, что, приступая к разбору явления, в основных уравнениях сразу обыкновенно отбрасывают некоторые члены. Так при наиболее полном и успешном анализе внутреннего трения необходимо начинают с того, что прямо отбрасывают члены, содержащие квадраты скоростей;[1] это здесь возможно, потому что скорости здесь малы. Для этого частного случая получается решение, а общего значения оно и не имеет. Поэтому общее учение о сопротивлении до сих пор немногое может позаимствовать от разработки вопросов о внутреннем трении и о движении воды по трубам, хотя вопросы чрезвычайно близки и хотя сравнение сопротивлений при малых скоростях с движением по трубкам с малыми скоростями, а затем сопротивления при больших

наблюдений. Вообще опыты с трубками делались, сколько мне известно, в большинстве случайно с трубами водопроводов, редкие с длинными трубами, бывшими в полном распоряжении экспериментатора, диаметры видоизменялись мало, температуры были едва известны и т. п., словом еще недостает для широких труб настоящих точных опытных данных. Оттого и нет связи между законами для широких и тонких труб. Теоретический интерес состоит здесь в том, чтобы вместо средней скорости течения по всей ширине трубки, как это принято у Прони, ввести, вслед за Навье, переменную скорость от центра к периферии и узнать трение взаимных слоев жидкости, имеющих разные скорости, и закон изменения этих скоростей, идя от центра к периферии, так же, как и функцию скорости (в капиллярных трубках это μv) при разных ее величинах. Теория предмета этого очень ясно изложена в „Cours de mécanique" par Collignion Hydraulique, p. 145 и след. и в „Cours de mécanique" par Bour, 1874, 350.

[1] Например, в капитальном сочинении Стокса, цитированном выше (стр. 310), дается начальное равенство движения жидкости:

$$\frac{dp}{dx} = \rho\left(X - \frac{du}{dt} - u\frac{du}{dx} - v\frac{du}{dy} - w\frac{du}{dz}\right) + \mu\left(\frac{d^2u}{dx^2} + \frac{d^2u}{dy^2} + \frac{d^2u}{dz^2}\right) + \frac{\mu d}{\rho\, dx}\left(\frac{d\cdot\iota}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw^1}{dz}\right) + \text{и т. п.},$$

где p давление, ρ — плотность, u, v, w слагающие скорости по прямоугольным осям, X слагающая ускорения, t время и μ коэффициент внутреннего трения. Допустим, что это основное равенство полно, но для анализа его необходимо упростить, пренебрегая членами с квадратом скорости и пренебрегая влиянием сжимаемости, а потому анализ начнется с допущения упрощенного дифференциального равенства:

$$\frac{dp}{dx} = \mu\left(\frac{d^2u}{dx^2} + \frac{d^2v}{dy^2} + \frac{d^2w}{dz^2}\right) - \rho\frac{du}{dt} \text{ и т. п}$$

То же, напр. у Мейера (Pogg. Annalen, т. 117) и у всех других.

[1] В подлиннике v. (*Прим. ред.*)

(обычных) скоростях сравнительно с течением воды в трубах с теми же (также обычными) большими скоростями — представляет много точек прикосновения и одно должно помогать другому, особенно если будут приняты во внимание явления, происходящие при угловых и разных других изгибах труб. Поныне, сколько мне известно, еще никто не старался восполнить этот пробел в гидродинамике, и только Сен-Венан, Ранкин и др. брали для расчета сопротивления параллельных плоскостей из знания явлений течения воды в трубах величину бокового сопротивления или трения. Так, Ранкин, из расчетов и опытов Вейсбаха над течением воды в новых, гладких, железных трубах определяет трение на 1 кв. фут плоскости, параллельной с направлением движения, равным 0.0036 v^2 англ. фунт., если v выражено футами и есть скорость движения воды по трубе; следовательно трение равно 0.189 v^2 кг на кв. метр, если скорости выражены метрами.[1] Мы видели выше (стр. 355), что из прямых определений Бофуа трение при метрической системе $= 0.16\ v^2$, если считать трение прямо пропорциональным с v^2, а из определения Фроуда для скоростей от 1 до 3 м, принимая опять пропорциональность с v^2, трение (стр. 369) на 1 кв. м $= 0.14\ v^2$ кг. Из этого видно, что хотя существует разность обоих родов определения трения, но сравнительно небольшая, объясняемая, если угодно, тем, что в трубках внешнее трение больше, чем в досках Бофуа и Фроуда. Чтобы выяснить связь между трением, определяемым по течению воды, и тем боковым сопротивлением, которое дают опыты Бофуа и Фроуда, рассмотрим в элементарной форме закон равномерного течения реки. Назовем чрез Q площадь каждого из двух поперечных сечений реки, чрез L расстояние этих поперечных сечений, чрез h разность высот или уровней в этих сечениях, чрез Δ вес куб. метра воды; вес всей массы воды между избранными сечениями будет $QL\Delta$. Этот вес падает с высоты h, следовательно, работа тяжести на всем пути в данное время $t = QL\Delta h$. Она, очевидно, должна быть равна работе сопротивления на том же пути, в то же время, если движение вполне установилось, сделалось равномерным. Но сопротивление только одно и есть, что трение о дно и по бокам реки, а оно выражается произведением площади на некоторую функцию скорости. Эта последняя, как мы видели выше (стр.

[1] Действительно, если принять вышеуказанный (стр. 391) коэффициент трения, принятый Вейсбахом за неизменный при больших скоростях, т. е. пренебречь членом, содержащим в знаменателе v, то получится число $k = 0.01439$ (принятое Вейсбахом), но судя по разности обыкновенного обозначения от Вейсбаха (желающие найдут достаточные указания при сличении Weisbach. Lehrbuch d. theoretischen Mechanik, 5-te Auflage, 1870, p. 1014 с Colignon. Cours de Mécanique, Hydraulique. 1870, p. 159), величину k следует разделить на $8\ g$ и помножить на $\Delta = 1000$, что и даст 0.18 для коэффициента трения.

343, 355, 368) близка к kv^2, но ей не равна, а может быть лучше выражена через cv^n, где n есть степень, близкая ко 2-й, или суммою $av^2 + \frac{bv^2}{\sqrt{v}}$, как принимает Вейсбах или вообще $f(v)$. Следовательно, применяя выражение $(av + bv^2)$, мера силы трения есть вес $Lq(av + bv^2)$, где q есть смачиваемый периметр речного дна, а Lq поверхность дна реки между взятыми ее сечениями. Этот сопротивляющийся вес действует на всем пути L (в то время t, когда действующий груз упадет на высоту h, сопротивляющийся пройдет путь L), следовательно работа сопротивления $= L^2q(av + bv^2)$. Обе работы в установившемся движении должны быть равны друг другу, а потому:

$$QL\Delta h = L^2q(av + bv^2).$$

Отсюда

$$\frac{Q}{q} \cdot \frac{h}{L} = \frac{av + bv^2}{\Delta}, \text{ или вообще} = \frac{f(v)}{\Delta}.$$ [1]

Дроби $\frac{Q}{q}$ и $\frac{h}{L}$ даются изучением рек, напр. $\frac{h}{L}$ есть падение реки, Δ в метрической системе $= 1000$, а потому изучение рек или изменение в них скорости (подразумевается средняя скорость всего сечения) дает трение. Работы над реками и особенно над каналами многих исследователей, начиная с Дю-Бюа — начинателя гидродинамики, — показали, что эта функция скорости $f(v)$ почти одна и та же при действительно установившемся течении (где Q, q, h и качество дна постоянны для данной части реки), хотя скорости разных рек и каналов, качество дна, объем протекающей в единицу времени и т. п. условия значительно изменяются. Величина трения на квадратную меру дна, обусловливающая движение рек, показывается этим постоянством лучше, чем каким-либо другим способом, и оно же объясняет изменение скоростей в данном сечении, начиная от берегов и поверхности (где вязкость для воды больше [2]), так

---

[1] Эту самую величину при изучении трения по трубкам найдем, зная радиус трубки r, потому что $Q_1 = \pi r^2$, $q_1 = 2\pi r$; h есть там действующее давление, а L длина трубки. Для капиллярных трубок $f(v) = \frac{4}{r}\mu v$, * т. е. изменяется с радиусом и пропорционально первой степени скорости. Базен показал нечто подобное для водопроводных труб.

[2] Это показывают *для воды* и ее растворов опыты Плато с очевидностью (см. J. Plateau. Statique expérimentale et théorique des liquides. Paris, Gautier-Villars, T. II, гл. VII, 1873). Он показал, что вязкость многих жидкостей на поверхности больше, чем внутри. Для этого внутри и на поверхности жидкостей он определил время одного размаха магнитной стрелки, уклоненной с востока на запад (собственно, при уклоне от магнитного меридиана на 85°) и приходящей к нормальному положению. Приводим средние его числа.

* См. стр. 400. (*Прим. ред.*)

что наибольшая скорость (подобно тому, как в трубе) соответствует некоторой струе, идущей посреди реки в небольшой глубине под уровнем (а в трубе почти в центре ее). Всего же важнее обратить внимание на числа, полученные Дю-Бюа (1779), Эйтильвейном (1801), Вольтмоном, Брюнингом, Дарси и Базеном, Гьюмфри и Абботом (Humphreys and Abbot) и многими другими из определения скоростей v, сечений Q, поперечных периметров q и падений $\frac{h}{L}$. Они сведены Прони, Сен-Венаном, Дарси, Хагеном, Гангюилле и многими другими.[1] Большинство выражает $f(v)=av+bv^2$. Влияние a мало, главная роль b. Прони, Эйтильвейн и Ламейер дают для b значения 0.309, 0.366 и 0.378, для a величину 0.044, 0.024 и 0.022. Сен-Венан [2] принимает $f(v)=0.401\,v^n$, где $n=\frac{21}{11}$. Вейсбах (для труб) считает $f(v)=av^2+b\sqrt{v^3}$. Брамс (1753), Тадини и другие выражают $f(v)=kv^2$, где $k=0.4$. В новейшее время исследователи применяют более сложные формулы. Таковы формулы Гьюмфри и Аббота, Базена (1865) и др. Так, Базен принимает $f(v)=\left(a+\frac{b}{r}\right)v^2$, где a и b постоянные, $r=\frac{Q}{q}$. Величина a принимается меняющеюся от 0.15 до 0.28 и b от 0.004 до 0.35, смотря по степени гладкости поверхности дна канала.[3]

По существу дела ясно, что понятие о трении, как о препятствии или сопротивлении, т. е. о силе, свойственной воде, даже

помещая в числителе время (секунды) одного размаха данной стрелки, наблюденное на поверхности, а в знаменателе — внутри жидкости. Вода $\frac{4.6}{2.4}$, глицерин $\frac{2160}{1170}$, насыщенный раствор соды $\frac{8.0}{4.6}$, селитры $\frac{4.4}{2.4}$. У других жидкостей обратно. Спирт $\frac{1.5}{3.3}$, скипидар $\frac{1.4}{3.4}$, оливковое масло $\frac{30.3}{79.5}$, эфир $\frac{1.1}{1.5}$, сероуглерод $\frac{1.2}{2.0}$. Хотя метода и сомнительна по точности, но различия так велики и наблюдатель так хорош, что общий смысл явления должно считать установленным несомненно.

[1] Подробное и обстоятельное изложение этого предмета, равно как и свод исследований, касающихся течения воды по трубам, находится у Grashof (Theoretische Maschinenlehre, T. I, 1874, 723).

[2] Annales des mines (4) XX; Sonnet. Dictionnaire des Mathématiques appliqués, 1867, стр. 174.

[3] Такие же формулы и выводы, столь же согласные в крупных числах как между собою, так и с числами, полученными для открытых каналов, и столь же разнообразные по способу их выражения, получаются для широких труб. Это показывает малое влияние стенок. Кроме того, прямые опыты показывают, что в водопроводных трубках сопротивление не изменяется с величиною давления. Особенный интерес в этом и многих других отношениях составляют практически важные исследования Дарси (Recherches expérimentales, relatives au mouvement de l'eau dans les tuyaux, 1857), который прямо наблюдает разность уровней в двух манометрах, сообщающихся с двумя местами трубы, по кото-

и здесь не уяснено окончательно ни опытным, ни теоретическим путем. То что называется здесь трением, имеет только некоторое отдаленное отношение к предмету, нас занимающему, т. е. определению бокового сопротивления (сопротивления по направлению, параллельному с путем) тела, движущегося в воде.

На 1 кв. м гладкой поверхности при скорости = 1 м трение составляет лишь 0.18 кг,[1] по исследованию Бофуа. Ту же почти величину дают опыты Вейсбаха над стеклянными и новыми свежими металлическими трубами, как видно было выше и что принял Ранкин. При $v=1$ м получается трение = 0.15 кг по Фроуду,[2] если движется твердое тело с гладкою поверхностью в неподвижной воде. А когда течет вода, то судя по предшествующему, в трубах и реках трение достигает 0.37 кг на кв. метр при $v=1$, т. е. в два раза больше первой величины. Известно, что при осадках в трубах и неровностях дна каналов величина эта еще растет. Вся замечаемая разность может быть приписана одним неровностям поверхностей труб и каналов, потому что определения Фроуда показывают, что трение поверхности грубого песка почти в два раза превышает трение гладкой поверхности. Так, например (приложение 7), на 20 футах расстояния на 1 кв. фут трение гладких поверхностей (при скорости = 10 фут.) = 0.24 фунт., для поверхности же, покрытой грубым песком, = 0.49 фунт. А описывая опыты этого исследователя (стр. 366), мы видели, что получаемые для неровной поверхности величины сопротивлений состоят из: 1) трения или бокового сопротивления и 2) так называемого прямого сопротивления, принадлежащего массе отдельных песчинок. Следовательно прямые результаты, полученные в реках и трубах, не дают прямо трения. Это выражают, допуская так называемое скольжение, различая внешнее трение от внутреннего — первое у поверхности твердого тела об его неровности, а второе — только между частицами жидкости. Ясно, что дело становится неуловимо сложным и произвол в применении к практике не уничтожается, хотя подробности дела и уясняются. И теперь, после многих исследований о трении (хотя разнообразия и точности в опытах еще и мало) жидкостей, еще нельзя, нет никакого права, не только считать трение за причину всякого сопротивления, но даже и определять его меру в разных случаях при разных скоростях. Все то общее, что ныне можно сказать по отношению к измерению трения жидкостей, мне кажется, заключается в следующем.

рой течет вода, и наблюденную разность высот делит на длину, что и дает ту величину, которую немцы называют „Leitungswiderstandhöhe". Более полные опытные и теоретические исследования принадлежат Хагену, Мейеру и Бусинеску.

[1] По формуле $0.029\,v + 0.1536\,v^2$, стр. 355.

[2] По формуле $0.122\,(v^2 + 0.27\,v)$, стр. 369.

1) Трение есть сопротивление (т. е. сила), которое рождается между жидкостью и телом (будет ли это та же, или другая жидкость, или твердое тело — все равно) при относительном их движении. Притом все равно — движется ли твердое тело в жидкости, или жидкость около твердого тела. В обоих случаях мера сопротивления, при прочих равных условиях, одна и та же. В опытах Кулона, Максвеля и др. движется диск в неподвижной жидкости, а у Пуазеля движется вода в неподвижной капиллярной трубке, — внутреннее трение выводится одно и то же, считая его пропорциональным v. Точно так же из опытов Вейсбаха над трубками и Бофуа над доскою — выводится одна величина трения, считая его пропорциональным v^2.

2) Трение это не зависит от давления, под которым совершается, и определяется скоростью, природою жидкости и мерою трущихся поверхностей. Поэтому оно глубоко отличается от трения твердых тел, а потому его было бы приличнее называть касательным (тангенциальным), или параллельным, или продольным сопротивлением.[1]

3) Определению подлежали до сих пор только те случаи трения жидкостей, когда направления трущихся плоскостей совпадали с направлением движения. Как велико трение на наклонных плоскостях, — неизвестно по опыту,[2] но во всяком случае должно предполагать, что на наклонной плоскости оно больше, чем на параллельной; это потому, что относительную скорость скольжения или трения на наклонной плоскости при уклоне α можно предполагать *близкою к* $\frac{v}{\cos\alpha}$, если на параллельной плоскости скорость $= v$. А так как сопротивление растет, почти как квадраты скоростей, то если сопротивление параллельной плоскости $= k$, то для наклонной оно близко к $\frac{k}{\cos^2\alpha}$. Поэтому можно думать, что при уклоне в 20° оно близко

---

[1] Название „поверхностное сопротивление" гораздо хуже, потому что на поверхности могут быть неровности, возвышения и тогда родится прямое сопротивление. Притом поверхность может быть наклонною и даже нормальною, а каково тогда трение — мы не знаем.

[2] Вот какой род определений, мне кажется, может дать о нем хоть некоторое понятие, весьма важное для утверждения фрикционной теории. Следует определить при данной скорости обычным способом (на параллельных площадях и досках, как у Бофуа или Фроуда) трение некоторой гладкой и некоторой шероховатой (напр. песчаной, как у Фроуда) площади. Затем определить сопротивления призмы (хотя бы с кривыми гранями, как у корабля) с определенными углами встречи, покрыв ее бока, наклонные к направлению движения, или гладкими, или шероховатыми плоскостями (или поверхностями), такими же, как прежде. Если сопротивление зависит лишь от трения, оно возрастет в обоих случаях одинаково. Если в обоих случаях при нормальной плоскости выйдет некоторая разность сопротивлений, то можно будет сделать уже некоторые дальнейшие заключения.

к 1.33 k, при уклоне $=60°$ оно близко к $4.00\,k$. Но подобное абстрактное заключение (равно как и заключение о работе трения) нельзя считать верным уже по одному тому, что при уклоне в 90° сопротивление было бы тогда бесконечным, потому что $\cos 90° = 0$. В действительности же нормальная плоскость представляет некоторое конечное, ограниченное сопротивление. Из этого одного видно, во-первых, что трение наклонной плоскости менее, чем $\frac{k}{\cos^2\alpha}$, а во-вторых, — что необходимо получить прямые численные данные для трения на наклонных плоскостях, если желательно иметь некоторую твердость в применении фрикционного учения к объяснению сопротивления.

4) Трение растет со скоростью и притом, повидимому, при очень малых скоростях (несколько миллиметров в 1″) оно пропорционально первой, а при значительных достижимых скоростях (до 8—10 м в секунду) почти пропорционально второй степени скорости. Если это так, то всего проще выразить трение (подобно тому, как предложил Кулон, вообще, для сопротивления) двучленом $av+bv^2$. Тогда станет понятным, что при малых скоростях трение пропорционально v, при больших v^2, а при обычных выражается суммою $av+bv^2$, как это видим в определении трения в реках, в трубках и в опытах Бофуа и Фроуда. Допущение пропорциональности первой степени скорости при малых скоростях делается на основании опытов над колебанием дисков в воде (Кулон, Мейер) и воздухе (Максвель, Мейер, Кунт) и над истечением воды и газов из капиллярных трубок (Пуазель, Грем, Хаген, Хагенбах и др.). Однако, до сих пор нет достаточно прямых опытов для твердого суждения об этом предмете, хотя он имеет, можно сказать, капитальнейшее значение для многих частей гидродинамики. [1]

---

[1] По моему мнению, следовало бы сделать прямые измерения трения данного тела при самых разнообразных скоростях. Для этого подходящим способом, мне кажется, может служить прибор, изображенный на 11-м листе, черт. 145. и 146. На вертикальной оси ab, приводимой в движение грузом e, при помощи нити, проходящей чрез блок d и намотанной на цилиндр c, закрепляются или две цилиндрических поверхности A и B (черт. 145), или три диска C, D, E (черт. 146). Когда они поставлены вдали друг от друга, как изображено на чертежах, тогда при вращении трение действует на бо́льшую поверхность. Но если их сдвинуть, то масса останется та же (трение в подшипниках и цилиндрах то же), а поверхность уменьшится. Так цилиндрическая поверхность B может плотно вдвинуться в A, а диски C и E могут быть плотно приложены к диску D. В этом последнем случае поверхность уменьшится около в три раза. Определяя груз e, сообщающий данную скорость вращения в случае сдвинутых и раздвинутых частей, мы по разности найдем трение выбывающей поверхности. Производя же определения при разных скоростях вращения, найдем зависимость трения от скорости. Подобный прибор заказан мною, и при помощи его я надеюсь решить некоторые вопросы о трении жидкостей, потому что многие поправки обычных опытных данных здесь уничтожаются. На чертежах изображена только схема прибора.

5) Когда поверхность, подвергающаяся трению, представляет значительные размеры, тогда несомненно можно *допустить*, во всех случаях, что мера трения пропорциональна мере поверхности. Но когда поверхность мала,[1] тогда можно думать, что трение сравнительно больше, чем по пропорциональности с большею поверхностью. Такое заключение можно сделать, изучая трение в трубках. Яснее всего это видно в законе Пуазеля, касающемся истечения из капиллярных трубок. Закон этот есть $O = \frac{\Delta \pi r^4 h}{8 \mu l}$, где O объем жидкости, вытекающий в 1″ при давлении h чрез трубку, радиус которой $= r$, а длина l, μ есть постоянное = коэффициенту внутреннего трения. Средняя скорость истечения v очевидно $= \frac{O}{\pi r^2}$. Если здесь трение пропорционально первой степени скорости, то, пользуясь уравнением, данным на стр. 395, имеем (так как $Q = \pi r^2$, $q = 2\pi r$, $\frac{Q}{q} = \frac{r}{2}$): $\frac{hr}{2l} = \frac{f(v)}{\Delta}$, откуда $f(v) = \Delta r \frac{h}{2l}$. Но по закону Пуазеля $\Delta r \frac{h}{2l} = \frac{0.4\mu}{\pi r^3} = \frac{\pi r^2 v 4\mu}{\pi r^3} = \frac{4\mu}{r} v$, следовательно здесь $f(v) = \frac{4\mu}{r} v$. Здесь видно: во-первых, что трение $f(v)$ пропорционально первой степени скорости, а во-вторых, что коэффициент пропорциональности растет с уменьшением радиуса или уменьшается с его возрастанием, что выше и объяснено. Ту же зависимость коэффициента трения от радиуса нашел в результате многих опытов (около 200) Дарси для водопроводных трубок. Он выводит, напр. для чугуна, что та величина, которую мы выше обозначили чрез $f(v) = v^2(0.2535 + \frac{1}{r} + 0.00223)$, если скорость больше 100 мм.

Для диаметра трубы в 0.5 м $f(v)$, по его опытам, $= 0.266$, при диаметре же 0.1 м она $= 0.318$, а при диаметре 0.01 м $f(v) = 0.9$, если стенки еще не покрыты осадком.[2] Подобного же результата достиг Вейсбах.[3] Эта зависимость трения или параллельного сопротивления от линейных размеров поверхности (от радиуса кривизны) представляет одно из обстоятельств, долженствующих значительно усложнить дело изучения сопротивлений, если выводы для трубок окажется необходимым применять во всех случаях трения. Общность такого вывода или его неприменимость к объяснению всех явлений трения опять может решить только правильно поставленный опыт. Для этого достаточно

---

[1] И, может быть, когда радиус кривизны мал, как это будет в трубках малого диаметра.

[2] Colignon. Cours de Mécanique, Hydraulique. 1870, p. 180, 184.

[3] Lehrbuch d. theoret. Mechanik. 1870, p. 1016. „Коэффициент сопротивления для трения воды при движении по трубам уменьшается с возрастанием как скорости, так и с возрастанием диаметра, хотя в этом последнем отношении медленнее".

определить трение нескольких движущихся поверхностей одной и той же величины, но различных по сложению, напр. цилиндрической и призматической, при различной длине и ширине. Должно, однако, не забывать, что даже и для трубок только при малых поперечных размерах чувствительно влияние поперечных размеров, при больших же размерах (как, например, у корабля) влияние сглаживается и становится в ряд неизбежных погрешностей расчета и опыта. Изучая и применяя в практике вопросы сопротивления, не должно, однако, упускать из виду указанную сторону предмета.[1]

Когда говорится о поверхностном трении жидкостей вообще, тогда должно, конечно, отличать трение гладких и шероховатых плоскостей, но явление в последних сложно и состоит из трения в собственном смысле и из сопротивления неровностей (внешнее трение), как это доказано нами на стр. 366. Трение, в тесном смысле этого слова, или продольное (касательное) сопротивление, судя по всему, что знаем,—одно и то же (по крайней мере при обычных и особенно при малых скоростях) для всяких гладких *смачиваемых* поверхностей твердых тел, потому что зависит от взаимнодействия прилипшего (хотя бы и подвижного) слоя жидкости и остальной ее массы; оно по своей природе тождественно с тем, что называют внутренним трением или особым индивидуальным качеством жидкостей (и газов). От этого рода трения зависит трата сил, по той причине, что часть движения от твердого тела (или обратно) передается жидкости и в ней превращается (прямо или косвенно) сперва в вихри, под конец в теплоту. Сопротивление же неровностей того же рода, как и сопротивление нормальной движущейся пластинки. Так как на данной плоскости неровности могут быть весьма различны по качеству и количеству, то постоянства коэффициента трения здесь ждать нельзя, и у каждого рода поверхностей будут свои числа. Однако простые геометрические соображения показывают, что без явно ощутимого изменения поперечного сечения (тела или трубки), а следовательно и без заметного изменения в мере поверхности (при измерении проходят как бы по вершинам неровностей), нельзя ждать возрастания действительной поверхности больше, чем в 3—4.5 раза,[2] а потому, в грубом приближении, считая трение пропорциональным дей-

---

[1] Быть может, что даже точнейшие опыты покажут вновь независимость сопротивления от диаметра, если движение совершается в безграничной среде, как можно думать это по совокупности данных, ныне известных о сопротивлении (глава 3) шарообразных тел.

[2] Вообразим значительную плоскость размера s^2 покрытою кубами, сторона которых и взаимное расстояние равны малой величине c. Очевидно, что на площади s^2 уместится $\frac{1}{2}\left(\frac{s}{c}\right)^2$ таких кубов, и теперь общая, неровная поверх-

ствительной поверхности мелко шероховатого тела, нельзя ждать бо́льшего увеличения трения, как в 4.5 раза (но не в 5 или 6 ... n раз) при переходе от гладких площадей к шероховатым. Это первичное соображение оправдывается и в опытах Фроуда, и при изучении водопроводных труб, но, конечно, при условии приблизительного равенства скоростей. Мы избираем скорости от 1 до 3 м в секунду и выражаем здесь, для этих пределов скорости, трение пропорциональным квадрату скорости: $f = kv^2s$. Для гладких поверхностей, как мы видели выше (стр. 369), по данным Фроуда:

$$f = 0.14\ v^2s,$$

если за единицы взять килограммы и метр. Точно так же выводим из данных Фроуда (приложение 7) для поверхностей, покрытых средним песком (medium Sand):

$$f = 0.27\ v^2s.$$

Если для водопроводных труб возьмем наиболее полные и новые выводы Дарси, то (считая радиус трубы бесконечным) для новых железных и чугунных труб имеем:

$$f = 0.25\ v^2s,$$

а для старых, покрытых осадком:

$$f = 0.51\ v^2s.$$

Отсюда видно, что, переходя от возможно гладких площадей к несомненно шероховатым,[1] получается возрастание трения в отношении 0.14 к 0.51, т. е. как 1 : 3.6, чего и можно ждать. Но отсюда следует, что нет возможности определить заранее, какова мера трения k в каждом данном случае, напр. в случае дна корабля, даже в частях его, параллельных оси движения, а особенно в том случае, когда на том дне осел не мелкий,

---

ность всей площади будет $s^2 + 4c^2\frac{1}{2}\left(\frac{s}{c}\right)^2 = 3s^2$, т. е. неровности увеличат плоскость в 3 раза. Если представить на место кубов полушары или пирамиды — плоскость возрастет меньше, когда высота равна расстоянию. Вообразив же расстояние кубов меньшим, чем их бок, получим большее возрастание поверхности, но и в пределе, когда расстояние кубов = 0, все же возрастание не будет больше, чем в 5 раз. А допустить некоторое расстояние необходимо, если признавать неровности не сплошными, а потому очевидно, что малые неровности увеличат поверхность не больше как в $4\frac{1}{2}$ раза, т. е. действительная поверхность не может превосходить видимую (измеряемую по вершинам неровностей) более, как в $4\frac{1}{2}$ раза.

[1] И не отличая трения в трубах при ограниченной массе жидкости от трения в безграничной среде, а может быть мера трения в обоих случаях и не одна и та же. Однако, как мы видели выше (стр. 391), Вейсбах получил даже для железных трубок (новых) $k = 0.18$, число, близкое к данному Бофуа и Фроудом.

а крупный осадок ракушек, водорослей и т. п. Тогда можно ждать еще бо́льшего возрастания трения.[1] Из этого сопоставления мне кажется очевидным и несомненным то следствие, что *одним трением ни при какой форме движущегося тела нельзя объяснять всего сопротивления*, потому что тогда сопротивление, отвечающее данной форме, напр. корабельной-волновой, устроенной по Скотт-Россели, изменялось бы не только с переменою меры поверхности, но также и возрастало бы с переменою состояния поверхности гораздо больше, чем встречается в действительности. Пусть смачиваемая, хотя бы и увеличенная (по Ранкину), поверхность корабля $= s$. Сопротивление его $= f = kv^2s$, а работа двигателя, идущая для преодоления сопротивления, $= fv = ksv^3$. Допустим, что сила машины делится поровну между полезною работою, идущей для преодоления сопротивления, и неизбежно теряющеюся на трение механизма потерю силы в винтовом двигателе и т. п. Очевидно, что число лошадиных сил машины будет $\frac{2\,ksv^3}{75}$, следовательно для скорости в 5 м (около 10 узлов) для корабля, у которого $s = 600$ кв. м, потребное число лошадиных сил машины было бы: $k\frac{2\cdot 600\cdot (5)^3}{75} = k\ 2000$. Если принять $k = 0.2$, как для гладкой почти поверхности, то требуется по расчету 400 л. с., а если принять $k = 0.5$, как для труб, покрытых ржавчиной, то потребуется уже 1000 сил, а если принять k равным еще большей величине, что и должно сделать, если поверхность покрыта раковинами и т. п., — то нужно более 1000 сил.

Такого большого различия, сколько мне известно, в действительности нет. При данных формах определенного корабля замечаются различия сопротивлений в гораздо меньшей мере даже тогда, когда дно обрастет ракушками и т. п. неровностями и когда можно ожидать увеличения трения в 4—5 и более раз. Если бы понятие о трении как об единственной причине сопротивления было верно, то потр бовалось бы при этом увеличить силу машины в 4—5 и более раз, чтоб достичь тех же скоростей. А в крайних случаях, сколько мне известно из отчетов о дальних плаваниях, замечают, даже после сильного обрас ания дна, возрастание в трате двигателя (напр. топлива) для получения той же скорости много, что в 2 раза.[2]

---

[1] Тогда *поверхностное* сопротивление возрастет много больше, чем в 4, даже 5 раз, потому что и поверхность во много раз возрастет, и явятся новые бо́льшие вихри, и прямое сопротивление наростов возрастет.

[2] Слыхал я, но подлинных данных не знаю, что под влиянием учения о трении как о господствующей силе со ротивления стали заботиться о тщательной полировке пароходных винтов и подводных частей корабля, но желаемых выводов не получили. Подлинные данные были бы очень интересны.

Из всего этого следует, что трение жидкостей есть важный элемент сопротивления, что оно изменяется так же, как сопротивление, а потому может с ним смешиваться, но что оно недостаточно хорошо обследовано для поверхностей наклонных, а потому: 1) можно делать с некоторой уверенностью поправку на трение только для поверхностей, параллельных с направлением движения, да и то в случае гладкости поверхности, и 2) трение наклонных плоскостей и всяких шероховатых не поддается еще расчету, а вследствие этого 3) при изучении сопротивления, вообще, напр. для нахождения форм, приличных кораблю или телам наименьшего сопротивления, и для нахождения форм наибольшего сопротивления, приличных двигающим органам (винту, крылу и т. п.), не следует в большинстве случаев выделять трение от всех других видов сопротивления, а следует, пока, изучать сопротивление в его мере, не отличая трения и не вдаваясь, пока, в разбор того, откуда оно ведет свое начало. Относительно трения жидкостей важнее всего заметить, что при обычных скоростях его законы очень близки к общим законам сопротивления. Так, например, тот и другой род сил растет почти пропорционально квадрату скорости. Это позволяет делать слияние и это объясняет историю начала исследований сопротивления, когда трение не принималось вовсе в расчет.

Поэтому в следующей главе, посвященной разбору измерений сопротивления, мы рассматриваем его, не отличая в большинстве случаев трения, а говоря лишь о сопротивлении вообще. Фрикционная и инерционная теории сопротивления — обе не могут быть сочтены за достаточно совершенные; надо ждать иных приемов для геометрического разбора явлений сопротивления. Изучение их должно быть пока — делом наблюдения, опыта и измерения.

Глава II

Измерение сопротивлений

Измерения, касающиеся сил, составляют ту важную часть знания, которая предполагает уже некоторое знакомство с силами и чаще и скорее других способов знания ведет к обладанию измеряемыми силами, потому что в мере и числе ум находит твердую опору для проверки своих построений и попыток постижения сущности дела. Поэтому способы измерения сопротивлений и самая их мера заслуживают главного внимания при изучении занимающего нас предмета, если желательно выбраться в нем из области схоластики и эмпиризма в сторону истинного понимания. Практике прямо нужны те числа, которые получаются при этих измерениях. Гипотезы и теории должны осно-

ваться на мере сопротивлений, ею оправдываются и при ее помощи будут совершенствоваться. Не надо забывать однако, что нередко числа, получаемые в обычной практике, бывают результатом таких наблюдений, в которых сочетаются разные неопределимые условия и обстоятельства, запутывающие понимание, а не упрощающие его. Для понимания же дела, т. е. для истинного обладания теориею, а чрез нее и практикою предмета, и для построения гипотез необходимы цифры *опытов*, когда определенные обстоятельства изменяются, влияние же других по возможности устраняется, или когда влияние невозможных для устранения обстоятельств строго определяется и на них делается поправка. Так, например, для практики особенно важно знание сопротивления плавающих на воде тел, особенно таких, которые имеют форму судов. Но здесь поверхностное волнение, образование волн, сопутствующих движущемуся телу, перемены температуры, сопротивление воздуха и т. п. неустранимые влияния усложняют понимание явления в его чистоте. Поэтому для теории сопротивления во много раз ценнее измерения, полученные для тел, вполне погруженных, сравнительно с плавающими, и даже опыты в малом виде сравнительно с опытами в больших размерах, потому что при этом легче и вернее устранимы препятствия точности (напр. волнение, ветер, неравенство температур и т. п.). Практике мореходного дела, на первый взгляд, нужнее всего найти связь форм парохода с тратою угля для получения желаемой скорости. Но отыскание этой связи, даже и при тысяче измерительных наблюдений, едва ли даст что иное, кроме грубой и вполне эмпирической зависимости, применимой только в данном частном случае, потому что связь сложна и в числе переменных будут: формы парохода, формы винтового двигательного органа, устройство топки паровика и машины, трение механизмов, скорость, волнение, крен, даже просто качества топлива, механиков и истопников. Освободить от всех этих влияний одно желаемое, напр. форму корабля, практически нельзя.

Поэтому поучительны для сопротивления не всякие измерения, наблюдения и опыты, для того назначавшиеся. Числа числам рознь: одни — стесняющий балласт, другие — двигающий груз. Притом из многих родов наблюдений возможно извлечь только относительные, а не абсолютные числа, да и то приближенные. А потому в этой главе, посвященной измерениям сопротивлений, нашли место не все известные мне измерения, а только те, хотя бы заведомо не совершенно полные и не вполне точные, которые представляются мне поучительными в положительном или отрицательном смысле.

Цель, преследуемая мною при собирании материала и при его обработке, состоит в том, чтобы сопоставить в одном месте

все известные мне поучительные измерения сопротивлений, сличить их между собою, отобрать из них наиболее достоверные и тем положить основание для возможности узнания истинных законов сопротивления и для составления при их помощи затем гипотез и теорий, согласных с природою всего дела. Не думаю при этом вовсе о том, чтобы мне самому воспользоваться собранным; буду однако делать свои замечания, а, главное, хочу обратить внимание других на — почти ныне забытые — интересы сопротивления и желаю облегчить новым силам путь, давши им запас прежних измерений, на собирание которого (по возможности из подлинников) я сам потратил немалое время. Словом, приступаю к делу без предубеждений, без готовой гипотезы и стараюсь быть возможно объективным, излагая то, что не мною сделано, и если прибегаю к определенному, как бы теоретическому приему, пользуясь выражением:

$$R = k\Delta M v^2, \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (I)$$

то лишь потому, что иначе нельзя сделать сличимыми между собою измерения разных наблюдателей и в разных случаях.

Выражение (I) требует, чтобы сопротивление R изменялось пропорционально плотности Δ, плоскостной мере M поперечного (к направлению пути) сечения и пропорционально квадрату скорости v. Если б это было так, то величина коэффициента k выходила бы одна и та же при разных плотностях, сечениях и скоростях для всяких наблюдений, касающихся тел подобных, представляющих одни и те же углы встречи или одинаковый закон смены этих углов, напр. для всяких шаров, плоскостей, наклоненных под известными углами (если M, Δ и v переменны), или для разных подобных конусов, или для разных нормальных площадей и т. п. Если же для данной формы величина k будет непостоянна при разных Δ, M и v, то все же можно из нее извлечь изменение сопротивления с переменою Δ, M и v, как из непосредственного опыта. Например, получая разные k_1, k_2, k_3 для скоростей v_1, v_2, v_3, можно легко видеть и выразить зависимость сопротивления от скорости, или считая $k=f(v)$, или прямо помножая k_1 на v_1^2 и сличая $k_1v_1^2$ с $k_2v_2^2$, $k_3v_3^2$ и т. д, и затем находя зависимость этих произведений от скорости. Если $kv^2=\eta(v)$ и если функция $\eta(v)$ станет известна из опыта, то очевидно, что $R=M\Delta\eta(v)$. Следовательно, рассчитывая для удобства сличений вместо R величину k, мы не предрешаем законов сопротивления, а делаем только их вывод более легким. Это особенно потому так: 1) что главная и естественная цель исследований сопротивления — найти зависимость R от формы тел, а сличение величин k так же приведет к зависимости сопротивления от формы, как и прямое сличение величин R при одинаковых Δ, M и v, и 2) что множество опытов прямо пока-

зывают, что сопротивление R, если не вполне точно, то, по крайней мере в первом приближении, действительно почти пропорционально и Δ, и M, и v^2, следовательно в величинах k должно замечаться различие преимущественно в зависимости от формы тела, т. е. от его относительной длины, углов встречи, радиусов кривизны и т. п.

Итак, величины k,[1] которые мы станем далее сличать, выводятся каждый раз из наблюденных в опыте Δ, M, v и R, потому что мы условно означаем:

$$k = \frac{R}{\Delta M v^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{II}$$

Величину k мы будем называть *коэффициентом сопротивления* данной формы тела, напр. шара, призмы и т. п.

Все величины относятся нами к метрической системе измерения, а именно там, где особо не сказано, в какой мере даны измерения, должно считать, что:

k есть сопротивление *в килограммах* (или, иногда в граммах, если сопротивление мало) для тела определенной (указанной в выводе) формы, движущегося со скоростью 1 метра в секунду и имеющего поперечное сечение = 1 кв. метру, в жидкости, которой 1 куб. метр весит 1 килограмм. Поэтому, если желаем знать k для воды, должно его умножить на 1000, а для воздуха в обычных условиях (около) на 1.2.

R есть наблюденное сопротивление в килограммах, при данной форме и значениях Δ, M и v.

Δ вес в килограммах одного куб. метра той жидкости, в которой происходит движение. Приближенно, для воздуха при обычных в опытах температурах (около 15°Ц.) и давлениях (около 750 мм барометрической высоты) $\Delta = 1.2$, а для воды для обыкновенных температур Δ около 1000. Точные числа плотностей воздуха и воды даются в физических сочинениях и приведены, между прочим, в моих сочинениях: „О соединении спирта с водою“ (1865, стр. 40 и 54), „Об упругости газов“ (т. I, 1875

---

[1] Это k относится к тем K и K_1, которые мы применяли в 1-й главе (стр. 306—314) как $\sin^2\alpha : 1$ и как $\frac{\sin^2\alpha}{2g} : 1$, если имеем дело с плоскостями а если имеем дело с телами, то как интегральная функция синусов угла встречи (см. приложение 2) относится к единице. Те коэффициенты не зависели от формы тела и от углов встречи, а это k есть функция углов встречи и форм тела. Законы Ньютона (приложение 1) и обыкновенной теории (приложение 2) оказались наиболее слабыми по отношению к углам встречи и к формам тела, а потому мы и вводим величины k, которые преимущественно выражают изменчивость сопротивления от углов и форм. Если бы законы сопротивления так же хорошо прилагались к формам, как к скоростям или размерам M, то вместо k было бы нагляднее, удобнее ввести величины K или K_1.

стр. 61—66) и „О барометрическом нивелировании" (1876, стр. 13—23 и 181).[1]

M наибольшее поперечное (т. е. перпендикулярное к направлению движения) сечение тела.[2]

v скорость, *считая ее равномерною*,[3] в секунду в метрах, или число метров, проходимых в одну секунду.

Если измерения даны исследователем в других единицах, напр. в футах и фунтах, то это всегда ясно обозначается в изложении и при этом всегда дается общий вывод по метрической системе.

Находя значения k, мы не отличаем теперь в этой величине трения от прямого сопротивления, как то делает, по примеру Бофуа, большинство позднейших писателей, а особенно Буржуа, потому что выкидывать трение можно с уверенностью только для плоскостей или поверхностей, параллельных с направлением движения, а во всех других случаях, преобладающих в исследованиях, нельзя этого сделать, потому что мера трения неизвестна для площадей нормальных или наклонных к пути. Какова, напр., величина трения для шара? Отвечать на это можно, только задаваясь гипотезою об изменении трения с наклоном элементарной площадки, а считать трение на всякую поверхность равным трению на параллельную с путем площадь — есть тоже гипотеза, притом лишенная всякого основания. Только впоследствии, после свода опытных данных, мы можем возвратиться опять к определению роли трения во всей мере сопротивления, выражаемой величинами R и k.

Отчет об измерении сопротивлений я считаю наиболее удобным расположить по способам, применявшимся при измерениях, потому что прямые данные опытов необходимо подвергать различным поправкам и переводам, о которых удобнее говорить сразу для целой системы данных, полученных одинаковыми или

---

[1] Сочинения, т. VI, 1939, стр. 320—325 и этот том, стр. 69—79 и 190. (*Прим. ред.*)

[2] Очевидно, что для одного и того же куба, призмы и т. п. тел (только не для шара) величина M изменится, смотря по изменению направления движения. Напр., если дана квадр. * призма высоты h, в основании $a \times b$ м, то при движении вдоль призмы $M = ab$, а при движении в направлении, перпендикулярном оси и стороне a, $M = hb$; при уклоне — опять иное.

[3] При неустановившемся движении (ускоренном или замедленном) нельзя ждать такой простой зависимости между R и v, как при равномерном установившемся движении, а потому случаи первого рода (вообще, мало изученные и представляющие свой, особый интерес) мы избегаем рассматривать и только падение тел вводим в расчеты, но предпочитаем, когда (как при падении относительно легких тел) начальная скорость быстро достигает предельной, постоянной скорости, да еще рассматриваем случай замедленного движения ядра, потому что он хорошо обработан в артиллерийских опытах и еще потому, что на кратком расстоянии скорости почти постоянны.

* Повидимому описка вместо „прямоугольная". (*Прим. ред.*)

подобными приемами. По этой причине, говоря об известном способе нахождения сопротивлений, мы должны сперва коснуться теории каждого из опытных приемов.

Перечислим главные способы, служившие до сих пор для измерения сопротивлений. Должно прежде всего ясно отличить те способы, в которых двигается среда (вода или воздух), от тех, где движется тело в неподвижной среде. Первые, говоря вообще, мало надежны, по той причине, что скорости движения среды неодинаковы и трудно определяемы с достаточною точностью. Так, вода рек течет неодинаково быстро на разных глубинах, на разных расстояниях от берегов, в разных местах реки на той же глубине и на том же расстоянии от берегов, смотря по близости и профилю дна, смотря по ветру и т. п. Это ясно показано еще в прошлом столетии Дю-Бюа, а в 60-х годах нашего столетия, особенно после знаменитых работ американцев (Humphreys and Abbot) над течением Миссисипи и др., предмет этот подвергся обширной и точной разработке, заставляющей сомневаться в достоинстве чисел, получающихся для сопротивления неподвижных тел, помещенных в воду. Не менее шатки определения, производимые в струе ветра. Непостоянство скорости ветра на данной высоте известно каждому, кто имел случай делать определение этих скоростей в течение быстро следующих друг за другом времен наблюдений. Качания привязанных аэростатов и змейка показывают, что и на некотором удалении от земли скорость ветра непостоянна. Близ земной поверхности, где делались до сих пор подобные определения, даже в самом направлении ветра происходят тем более частые и заметные изменения, чем слабее сила ветра. Самые способы определения скоростей ветра подлежат сомнению по одному тому, что анемометры обыкновенно или не регулируются, или их регулирования производятся в неподвижном воздухе комнаты, заставляя их двигаться по кругам с определенною скоростью, а такой способ, при всех поправках,[1] включает предположение о том, что сопротивление тел и давление на них одинаково при движении среды с тем, которое отвечает движению тела, а это подлежит, после исследований Дю-Бюа (стр. 326—327), сомнению и во всяком случае требует особой опытной проверки потому уже, что регулирование делается поневоле в ограниченном пространстве комнаты, а не в безграничной среде. Остается тот способ определения скоростей ветра, который употребили Мариотт, Тибо и др., а именно скорость полета пуха; но он по своему существу не допускает ни отчетливости, ни удобства, а потому его ре-

[1] Напр. таких, какие применял г. Дорант при своих замечательных исследованиях под анемометрами (Метеорологический Сборник СПб. Академии, ред. Вильд. тт. 4 и 6).

зультаты мало надежны. Для метеорологических целей разные анемометры, дающие среднюю скорость ветра или путь, пройденный ветром в час (или в секунду, что узнается уже по расчету), могут считаться удовлетворительными, но для получения сопротивлений важно знать скорость ветра в момент наблюдения, а ее-то и нет средств знать с достаточною точностью, при современном запасе приемов. Еще менее, чем в реке и на ветру, надежны определения, производимые при помощи искусственного течения воды и воздуха в искусственных каналах, струях, трубах и т. п., потому что размеры поясов с постоянными скоростями токов здесь еще более ограничены, вследствие неизбежной в подобном случае малости размеров искусственных приспособлений. Всякие определения сопротивлений, в текущей воде и в движущемся воздухе, имеют однако ценность, особенно при значительном числе наблюдений, когда в средних величинах можно думать, что скорость движения среды определена удовлетворительно, и еще тогда, когда единовременно исследуются давления на разные тела.[1] На основании вышесказанного и вследствие малого числа наблюдений, сделанных в текучей воде и на ветру, я обращаю преимущественное внимание на такие способы определения сопротивлений, в которых среда была неподвижна, а двигался в ней предмет, тем более, что именно эти определения ближе всего касаются прямых задач сопротивления, а потому распределяю около соответственных приемов в неподвижной среде те немногие наблюдения, которые считаю наиболее поучительными из числа сделанных в подвижной среде.

Главного внимания заслуживают, конечно, наблюдения, произведенные в столь больших массах воды, что их можно считать беспредельными, т. е. такие, для которых близость стенок не оказывает влияния на меру сопротивления. Но так как и те измерения, которые произведены в узких сосудах, или при близости дна, или у поверхности, имеют свой несомненный интерес, а иногда и не могут быть заменены другими (напр. наблюдение скоростей падения в воде никогда не производились в больших

---

[1] В большой реке, применяя малые предметы и прямой весовой способ определения сопротивлений (вертикальное коромысло, внизу в воде предмет, а на конце верхнего плеча — динамометр или чашка весов), можно с большим удобством определять относительные сопротивления разных предметов; особенно же мне кажется, что подобный способ определения может быть пригоден для изучения моделей вновь строящихся судов. Конечно, при этом скорости неизменны, а мы увидим, что изучение относительных сопротивлений дает разные величины при разных скоростях (одна модель может быть выгоднее другой при малых скоростях, но хуже другой при больших скоростях), а тем не менее большинство вопросов практики может решиться даже и наблюдением с одной скоростью. За указанный прием говорит удобство, легкая сравнимость и легкость получения точного результата.

массах, а всегда в узких сосудах), то и эти роды наблюдений не приходится выделять в особые рубрики из числа наблюдений, производившихся в больших массах среды, а потому наше дальнейшее деление способов наблюдения основывается исключительно на различии приемов и снарядов, служивших разным наблюдателям для сообщения телам поступательного движения в среде. Притом многие из указанных далее способов наблюдения дают скорости движения, по существу своему неравномерные, но они тем не менее доставили важные численные данные, касающиеся сопротивления, особенно же первый способ.

1) *Падение тел* в воде и воздухе служило предметом изучения для многих наблюдателей и дало первые, сколько-либо точные числа, относящиеся до сопротивления; хотя в начале падения и получается скорость возрастающая, но только до известного предела, тем скорее достигаемого, чем меньше вес тела в среде и чем больше мера сопротивления, потому что равномерная скорость достигается именно при уравнении двигающегося веса и сопротивления.

2) *Качание тел* (маятников, дисков и т. п.) в воздухе и в разных других жидкостях исторически было весьма важным способом изучения сопротивления, хотя равномерной скорости здесь вовсе и быть не может, потому что, начиная от крайней точки размаха, скорость растет до средины размаха и от одного колебания до другого длины размаха (амплитуда качаний), а следовательно и скорости в средине пути (вследствие равной длительности времен колебаний или изохронизма) изменяются, а именно уменьшаются. Кроме того, при качаниях по дугам круга развиваются центробежные силы, долженствующие влиять на результаты наблюдения. Начиная от Ньютона, предмет этот изучался многими наблюдателями, но только Стокс в недавнее время дал полное толкование наблюденным явлениям.

Как ни ценны данные, полученные из измерения колебаний, тем не менее мы не станем их рассматривать в дальнейшем изложении по двум причинам.[1] Во-первых, потому что при них, как сказано выше, скорости неравномерны, а при перемене скоростей, в неустановившемся движении, нельзя ждать такой простоты вывода сопротивления, как при наблюдении движений, совершающихся с равномерною скоростью. Во-вторых, в качаниях, наблюдавшихся до сих пор, скорости, даже наибольшие (в средине размаха), малы, меньше, чем в большинстве других способов, а потому сопротивления, получаемые при этих наблю-

[1] Если к этим двум прибавить еще сложность и несовершенство расчета при ограниченности пространства, в котором происходят колебания, то, мне кажется, все это достаточно оправдывает мое решение не говорить далее об определении сопротивлений способами колебаний, тем более, что на стр. 323 и 337—338 изложены важнейшие из первоначальных данных, сюда относящихся.

дениях, не могут быть сравниваемы с наблюдаемыми по большинству других способов, где стараются иметь скорости, близкие к практически обыкновенным при движении по воде и в воздухе. Только при падении очень легких тел могут с удобством наблюдаться сопротивления, отвечающие малым скоростям, и этот прием для этой последней цели наилучший, потому что тогда скоро достигаются почти постоянные, малые скорости, движение совершается по прямым линиям и т. п. Я думаю, однако, что придет время, когда многие тончайшие вопросы сопротивления вновь станут решаться способом качаний, потому что он допускает большую точность данных.

3) *Полет артиллерийских снарядов* служит, после опытов Робинса и толкований Эйлера, предметом многих исследований, касающихся сопротивления воздуха. Хотя движение снарядов замедленное, но на краткой части пути среднюю скорость позволительно считать постоянною, и, наблюдая убыль скоростей, выводить из того меру сопротивления воздуха при больших скоростях. Мы мало станем останавливаться и на этом приеме определения сопротивления, потому что он подробно и тщательно разбирается в баллистике, напр. у Маевского, и еще потому что здесь скорости крайне велики. Хотя получаемые здесь числа сопротивления поучительны для теории, но для обычной практики движений в воде и воздухе, где скорости гораздо меньше, они не могут служить прямо для пользы дела. Притом здесь, как и в двух предшествующих приемах, нет того разнообразия в формах движущихся предметов (шары и продолговатые цилиндры), какое возможно в двух последних (5 и 6) из перечисляемых нами способов, наиболее пригодных для изучения сопротивления тел разных форм.

4) *Пароходы и другие суда* служили предметом изучения для исследования законов сопротивления. Большие размеры предметов вместе с некоторыми практическими удобствами наблюдений в большом виде (напр. вывод сопротивления по расходу топлива, по индикаторной силе машины и по знанию потери работы на винте, возможность прямых динамометрических определений при буксировке и т. п.) делают наблюдения этого рода ценными по многочисленности и крупности цифр. Но невозможность ручательства за точность многих входящих в расчет величин, одностороннее (если можно так выразиться) действие сопротивляющейся среды, общее всем плавающим телам (по их отношению к погруженным телам), а особенно неопределенность внешних форм и малая возможность их изменения не позволяют применять полученные результаты ни в каких других соображениях, кроме чисто практических, до кораблей же относящихся. Поэтому лишь немногие выводы (влияние скорости на меру сопротивления), добытые этим путем, могут найти место в изло-

жении, имеющем целью общее, если угодно, теоретическое знакомство с предметом, а не прямо практику морской архитектуры. Думаю, однако, что наблюдения этого рода со временем, когда будут более точны, чем ныне, могут принести чрезвычайно важные плоды для самой теории сопротивления, особенно тогда, когда для опытов будут служить корабли совершенно определенных форм[1] и с гладкими подводными поверхностями.

5) *Способ круговращения*, в первый раз примененный Робинсом, служил затем (лист 3, черт. 19)[2] для добычи большинства данных, применяемых в учении о сопротивлении, потому что это единственный способ, удобный для кабинетных исследований, где однако легко изменять скорости и качество среды и определять меру сопротивления по весу гири, служащей двигателем, и меру скорости по числу оборотов прибора и расстоянию предмета от оси вращения. Главное достоинство его — легкость наблюдения и легкость достижения равномерной скорости. Главные недостатки этого способа — большая поправка на трение и развитие центробежных сил. Эти два обстоятельства делают этот прием менее ценным, чем следующий, но не должно забыть, что влияние указанных обстоятельств подлежит изучению, и полученный результат может быть поправлен в этом отношении, хотя до сих пор и мало обращали на этот предмет внимания. Реакционное (перпендикулярное) сопротивление (стр. 309) изучалось почти исключительно этим способом, и здесь, в применении к устройству и изучению винтового двигательного органа или такого приемника силы, как крылья ветряной мельницы, прямые результаты опытных исследований получают прямое практическое значение, потому что в опыте и практике одинаковым образом совершается круговращение. Не подлежит для меня сомнению, что способ круговращения, как наиболее доступный для широких и разнообразных исследований сопротивления, будет еще разрабатываться и доставит еще большой фактический материал, как было то уже и до сих пор. Поэтому этот способ я подробно разбираю и с своей стороны предлагаю некоторые в нем изменения.

6) *Способ тяги* или прямолинейного движения (в жидкой среде тела испытуемой формы) грузом или динамометром дает

---

[1] Напр., хотя бы тех струйных очертаний, какие предлагает И. П. Алымов в "Морском Сборнике" (1879). Свойство струйной системы постройки состоит именно в том, что данное горизонтальное (грузовое) и наибольшее поперечное, (мидельное) сечения определяют и все остальные сечения без всякого произвола, а потому все формы корабля строго определяются двумя главными его сечениями. Было бы крайне интересно умножить число прямых определений для кораблей именно этих очертаний, задаваясь строго определенными главными сечениями.

[2] В тексте номер чертежа пропущен. (*Прим. ред.*)

прямее всех других меру сопротивления и позволяет проще всех других приемов получать точные цифры, выражающие сопротивление, потому что груз или — еще лучше — динамометр прямо, за малыми поправками, указывают сопротивление. Оттого-то опыты французских академиков, Бофуа и Фроуда, произведенные по этому способу, всегда служили важнейшею опорою для суждения о сопротивлении. Главное достоинство этого способа состоит затем в легкой возможности изменять размеры и форму тела, сопротивление которого хотят определить, и в близости применяемого приема к тому, который встречается на практике. Основной недостаток этого способа — его дороговизна и сложность, зависящие от того, что путь для движения тела надо иметь длинный; иначе равномерной скорости не получится, а это удобно можно достигнуть только при громадных и сложных приспособлениях. Не будь этой практически неудобной стороны дела, конечно, все измерения сопротивлений делались бы по этому способу, потому что он наиболее всех отличается непосредственностью. Данные, полученные этим способом, будут приведены с возможною полнотою в этой главе.

Всего естественнее было бы ждать накопления точных данных, касающихся сопротивления, при помощи прямого *весового способа*, подобного тому, который применил уже Дю-Бюа (стр. 307) и какой применяется для определения скорости течения рек; но до сих пор прием этот еще мало разработан, и если я упоминаю о нем, то имею в виду главным образом обратить внимание последующих наблюдателей на этот способ. По той же причине я описываю все те приспособления, которые, по моему мнению, могут дать с удобством точную меру сопротивления, применяя начала весового коромысла, на одно плечо которого действует сопротивление, а на другое уравновешивающий груз.

Здесь поправки ничтожны и существо способа соответствует способу тяги, представляя перед ним удобство легкой выполнимости и сравнительной дешевизны.

7) Все предшествующие способы дают целое сопротивление испытуемого, движущегося тела или тела, подверженного действию потока, а *трубка Пито* и ее различные видоизменения дают то давление, которое испытывает некоторая часть тела. Дю-Бюа, как мы видели (стр. 300—301), применил этот способ и проверил его результаты (стр. 307). Затем следовали другие, напр. Лагерхольм, Дюшмен, Дарси, Дюпре. Хотя приемы исследования здесь и многочисленны, но их нельзя считать доныне достаточно разработанными и могущими давать точные числа, а потому я посвящаю разбору этого способа лишь немного места, да и то только по тому важному историческому значению, которое имеет этот прием после работ Дю-Бюа.

К семи способам, какими собирался до сих пор численный материал для изучения сопротивления, конечно, со временем прибавится еще много других. Здесь же мы разберем накопившийся материал, собранный преимущественно тремя способами: падения, круговращения и тяги, и постараемся затем извлечь из данных твердые численные выводы для суждения о мере сопротивления, в разных случаях встречающегося.

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПО НАБЛЮДЕНИЮ ВРЕМЕН ПАДЕНИЯ

Существо этого способа основано на знании законов свободного падения, т. е. падения в пустоте, а эти законы прямо по опыту знать нельзя, потому что опыт производится в воздухе или другой, хотя бы и редкой, среде. Наблюдения давно показали, что скорость падающего тела растет с высотою и что падение разных тел в обычных условиях совершается не одинаково быстро. Аристотель придумал закон, державшийся до XVII столетия и учивший, что времена падения обратно пропорциональны весам, т. е. что тело, в n раз тяжелейшее, падает в n раз скорее или для прохождения данного пути употребляет в n раз менее времени, чем другое тело, в n раз более его легкое. Десятки веков учили этому. В XVII столетии профессор Галилей в Пизанском соборе, иезуит Риччиоли, с Гримальди и Кассиани, на башне Азинелли в Болонье, генуэзский патриций Балиани в цитадели Савоны и патер Ариага (этот проще всех— прямо заставлял падать с высоты стола камень, пух и корку хлеба) почти одновременно убедились опытом в неверности начала Аристотеля. Истинные законы падения, хотя и à priori'ные, дал в 1638 г. Галилей — истинный основатель физико-механических знаний, опирающихся на опыт и умозрение единовременно, берущих основу из опыта, развитие от умозрения и доказательство опять из опыта. Законы ускоренного падения, выведенные на основании допущения постоянного действия тяжести во все время падения, Галилей проверил опытами падения по наклонной плоскости. Торичелли развил и отлично изложил законы Галилея, а Риччиоли в 4-й книге своей „Almagest" описал очень тщательные, направленные против Галилея, новые свои (1640—1650) опыты с падением глиняных шаров с высоты 260 фут. К удивлению иезуитского ученого, доказывавшего библиею лживость Коперника, — опыт вполне оправдал Галилея, хотя, надо это ясно видеть, опыт в воздухе не может в строгом смысле быть согласным с законами падения, данными для пустоты и выведенными à priori — геометрическим путем. Риччиоли, Гримальди и Кассиани нашли, что времена падений T, выраженные в терциях

$\left(\frac{1}{60}\right.$ секунды$\left.\right)$, и проходимые пространства H, выраженные в римских футах, для глиняного шара, весящего 8 унц., суть: [1]

$T=$	50	100	150	200	250	260	терций,
$H=$	10	40	90	160	250	280	фут.

как и следует по законам Галилея, приняв, что в 50 терций шар проходит 10 фут., потому что, когда время увеличилось в n раз, проходимое пространство возросло в n^2 раз, как и следовало, по Галилею. Это утвердило законы, служащие началом всех *дальнейших точных* механических знаний. Только после законов Галилея и Кеплера стал возможен Ньютон.

Галилеем данные, априорные законы равномерно-ускоренного движения, или законы свободного падения тел, как известно, суть:

Путь от начала падения (высота падения) до истечения T секунд:

$$H=\frac{GT^2}{2}=\frac{V^2}{2G}=\frac{VT}{2}.$$

Время от начала падения до прохождения пути H:

$$T=\sqrt{\frac{2H}{G}}=\frac{2H}{V}=\frac{V}{G}.$$

Скорость на расстоянии H или через T сек. после начала падения:

$$V=GT=\sqrt{2GH}=\frac{2H}{T}.$$

Ускорение (напряжение) тяжести в пустоте:

$$G=\frac{2H}{T^2}=\frac{V^2}{2H}=\frac{V}{T}.$$

В опыте определяется лишь T и H — время и расстояние. Основное дифференциальное равенство, связывающее их, показывает, что приращение скорости $\left(\text{которая есть } \frac{dH}{dT}\right)$ в течение времени зависит только от постоянной силы тяжести G, а потому оно есть:

$$G=\frac{d^2H}{dT^2},$$

откуда и вытекает, чрез двукратное интегрирование, так как при $T=0$ и $H=0$, что

$$H=G\frac{T^2}{2}.$$

---

[1] Эти исторические подробности, касающиеся до галилеева открытия, взяты мною из книги Бенценберга (1804), о которой далее будет речь.

Так как вес тела P (в пустоте) изменяется с массою его m и с напряжением или ускорением тяжести G, служащим мерою тяжести, то:

$$P = mG,$$

а потому основными равенствами могут служить следующие:

$$P = m\frac{d^2H}{dT^2},$$

и

$$H = \frac{P}{2m}T^2.$$

Для ясности дальнейших рассуждений должно иметь в виду, что масса данного тела неизменна ни в каких условиях, а потому, если вес данного тела меняется в некоторых условиях, значит, меняется и действующее тогда ускорение, и наоборот— с переменою ускорения изменяется и вес. Поэтому значение напряжения тяжести для уровня моря:

$$G = 9.78 + 0.053\ \sin^2\varphi,^1$$

где φ есть широта места, отвечает только действию тяжести на тела, падающие в пустоте, так как падающее в воздухе или другой среде тело теряет часть своего веса, а потому тогда действующее ускорение тяжести будет меньше G.

Когда падение совершается в жидкой среде, плотность которой $= \Delta$, тогда *действующий* или *движущий вес*, или вес тела в жидкости, который обозначаем чрез p, уменьшится сравнительно с весом P в пустоте на вес вытесненного объема жидкости, а вытесненный объем найдется, если мы знаем d плотность (вес куб. меры) падающего тела, потому что объем тела $= \frac{P}{d}$. Следовательно,

$$p = P - \Delta\frac{P}{d} = P\left(1 - \frac{\Delta}{d}\right).$$

А потому при падении тела в некоторой жидкой среде напряжение тяжести уменьшается во столько же, во сколько и вес тела. Это новое, для каждого случая отдельное, значение напряжения тяжести означим чрез g, и так как

$$m = \frac{P}{G} = \frac{p}{g},$$

---

[1] Это выражение справедливее для России, чем общее выражение Сабина. На высоте z м от уровня океана напряжение тяжести $= G\ (1 - 0.0000031\ z)$. Подробности во многих сочинениях по физике, астрономии и механике, напр. см. мое сочинение „Об упругости газов" * (гл. 1, стр. 66). **

* В подлиннике „токов" (*Прим. ред.*)

** Сочинения, т. VI, 1939, стр. 325. (*Прим. ред.*)

то очевидно, что

$$g = \frac{p}{P}\, G = G\left(1 - \frac{\Delta}{d}\right) = \frac{p}{m}.$$

А потому, помимо всякого сопротивления, закон падения тел в среде, имеющей вес, выразится тем, что ускорение от тяжести здесь уменьшено, а потому произойдет что-либо одно из трех: или $\Delta = d$, тогда не будет ни падения, ни всплывания; или Δ больше d, т. е. тело легче, чем объем вытесненной жидкости, тогда g будет отрицательная величина (потому что $\frac{\Delta}{d} > 1$)—тело будет всплывать, а находящееся на поверхности — будет плавать на ней, или же, наконец, d больше Δ и тогда $\frac{\Delta}{d}$ есть правильная дробь, меньшая единицы, а следовательно g будет меньше G, и тогда произойдет падение, но более медленное, чем в пустоте. Этот один последний случай мы и станем здесь рассматривать, потому что он один до сих пор был подвергнут изучению.[1]

Итак, если бы падение совершалось в среде, имеющей вес, но не представляющей сопротивления, то оно было бы *равномерно-ускоренным*, как и свободное падение тел, только в данное время T проходимые от начала падения пространства H_1 были бы меньше, чем при свободном падении, потому что действующее напряжение тяжести было бы иное, а потому тогда закон падения был бы

$$H_1 = g\frac{T^2}{2} = G\left(1 - \frac{\Delta}{d}\right)\frac{T^2}{2} = G\,\frac{p}{P}\,\frac{T^2}{2}.$$

Но падение тел в жидкой среде совершается медленнее, чем свободное падение, не только потому, что уменьшается вес на вес вытесненной жидкости, но еще и потому, что действует сопротивление среды, направленное в сторону, противоположную с направлением движения. Если назовем сопротивление чрез R, то, зная, что сопротивление каждого тела в каждой среде возрастает вместе со скоростью, станет очевидным, что наступит, при некоторой скорости c, такое сопротивление, что оно будет равно весу тела

$$R = p,$$

а тогда ускорения не будет и, следовательно, прекратится прирост скорости и движение *станет равномерным*. Это показывает,

[1] До сих пор нет точных наблюдений над временами всплываний легких тел в воде или аэростатов в воздухе. Предмет этот однако подлежит точному измерению и достоин исследования, особенно в виду непосредственного применения к воздухоплаванию. Мне кажется, по сделанным мною попыткам, особенно удобным и интересным исследование всплывания маслообразных капель в воде и других жидкостях. Полезно также собрание точных данных для аэростатических поднятий. Законы всплывания в сопротивляющейся среде те же, что и законы падения.

что скорость падения всякого тела в каждой жидкости по истечении некоторого времени приближается к постоянной c,[1] зависящей от движущего веса тела p и от меры его сопротивления $k\Delta M$. Это есть главная обязанность падения тел в жидкостях. На ней основано устройство парашюта. Легко доказать, что постоянная скорость достигается только в бесконечно большое время, если иметь в виду абсолютную точность наблюдения;[2] но, принимая во внимание, что в действительных опытных исследованиях неизбежна некоторая постоянная погрешность в определении высот падения и во временах, а следовательно, и в скоростях, станет очевидным, что постоянная скорость c достигается тем быстрее (при прочих равных условиях), чем меньше движущий вес, чем больше сопротивление тела $k\Delta M$ и чем меньше c.

В самом деле, между скоростью v и временем t или пространством h, протекшими до ее достижения (считая начальную скорость=0), существуют при допущении (хотя бы условном) пропорциональности с v^2, следующие отношения:

$$\frac{2gt}{2.3026\,c} = \lg \frac{c+v}{c-v}\ ^{3}$$

и

$$\frac{2gh}{2.3026\,c^2} = \lg \frac{c^2}{c^2-v^2}.\ ^{4}$$

---

[1] Эта постоянная скорость означена в приложении 2, стр. 19—26, буквою a. Вводя обозначение c, я имею в виду удобство чтения и желаю выразить понятие постоянства — const.

[2] Доказательство видно из формулы A,* помещенной в приложении, стр. 20, потому что значение числителя становится равным значению знаменателя только при бесконечном t.**

[3] См. приложение 2, стр. 20, уравнение (10), где под знаком lg подразумевается неперов логарифм, а здесь — обыкновенный, и где a равно нашему c = = предельной скорости.

[4] Приложение 2, стр. 21, уравнение C. [См.] предшествующие замечания, а наше h равно x в приложении.

* Уравнения, о которых говорит Д. И. Менделеев в примечаниях 2—4, следующие:

$$v = \frac{a\left(e^{\frac{g_1 t}{a}} - e^{-\frac{g_1 t}{a}}\right)}{e^{\frac{g_1 t}{a}} + e^{-\frac{g_1 t}{a}}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (A)$$

$$g_1 t = \frac{1}{2}\, a \lg \frac{a+v}{a-v} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (10)$$

$$x = \frac{a^2}{2g} \lg \frac{a^2}{a^2-v^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (C)$$

(*Прим. ред.*)

** Приложение 2 не печатается (см. стр. 449). (*Прим. ред.*)

Вопрос разрешится, если мы определим то время t_c, протекающее от начала падения, или ту высоту h_c, при которых разность $c-v$ будет равна погрешности, *возможной* в определении скоростей. Назовем ее чрез $\delta(v)$. Абсолютная ее величина зависит, конечно, от возможной погрешности $\delta(t)$ в определении разности времен t_1 и t_2 прохождения тела чрез точки пути h_1 и h_2 и от погрешности $\delta(h)$ в определении разности этих высот h_1-h_2. Повторение опыта, совершенство приемов и т. п. дадут прямо наибольшие возможные значения $\delta(t)$ и $\delta(h)$ для каждого ряда опытов. А так как

$$v=\frac{h_1-h_2}{t_1-t_2},\ \text{то}\ \delta(v)=\frac{\delta(h)}{t_1-t_2}+\frac{(h_1-h_2)\delta(t)}{(t_1-t_2)^2},$$

следовательно, в каждом отдельном случае наибольшее значение $\delta(v)$ можно считать за величину известную. Требуется найти ту высоту h_c и то время t_c, при которых $c-v=\delta(v)$, что и возможно при помощи вышеприведенных двух уравнений, если в них принять, как и можно сделать для нашего теперешнего расчета, $c+v=2c=2v$, потому что при этом, когда $c-v$ мало, сумма $c+v$ мало отличается от $2c$ или от $2v$. Замечая, что $g=G\frac{p}{P}=9.8\frac{p}{P}$, получаем значения t_c и h_c, при которых достигается предельная скорость c с точностью $\delta(v)$:

$$t_c=\frac{2.303\,c}{2g}\lg\frac{2c}{\delta(v)}=0.1175\cdot\frac{p}{P}\,c\,[\lg 2c-\lg\delta(v)],\quad\ldots\quad(a)$$

$$h_c=\frac{2.303\,c^2}{2g}\lg\frac{c}{2\delta(v)}=0.1175\,\frac{P}{p}\,c^2\left[\lg\frac{c}{2}-\lg\delta(v)\right]\quad\ldots\quad(b)$$

Пусть, например, $\frac{P}{p}=40$ и пусть два определения скорости на некотором значительном расстоянии дали последовательно числа 0.21 и 0.20 м. Так как скорость в действительности должна увеличиваться, а она вышла уменьшающеюся, то из этого заключаем, во-первых, что погрешность в определении скоростей не меньше 0.01, и во-вторых, что предельная скорость c близка к 0.21, а потому, полагая $c=0.21$ и $\delta(v)=0.01$, мы получим $t_c=1''.6$ и $h_c=0^m.21$, а это показывает, что предельная скорость c достигается с точностью до $\frac{1}{100}$ уже чрез $1\frac{2}{3}$ сек. и на расстоянии $^1/_4$ м от начала падения. Из формул (a) и (b), которые составлены (надо не забыть это) в предположении $R=k\Delta Mv^2$,[1] стано-

[1] Если сопротивление пропорционально не v^2, а v, то предельная скорость достигается гораздо медленнее, а именно с погрешностью $\delta(v)$ она достигается во время, равное $\frac{c}{g}\ln\frac{\delta(v)}{c}$, вместо времени $\frac{c}{2g}\ln\frac{2c}{\delta(v)}$, как в случае выше

вится очевидным, что предельная скорость достигается тем скорее, чем меньше c и чем меньше отношение $\frac{P}{p}$ между весом в пустоте к весу в жидкости, что мы и желали доказать ради того, чтобы в каждом частном случае можно было знать то расстояние h_c, от которого, в пределе возможных погрешностей, скорость можно считать уже за предельную. Если в расстоянии большем, чем h_c от начала падения, будет определена (лучше, конечно, если определение будет еще повторено и чрез некоторое расстояние окажется неизменным) скорость падения, то ее поэтому можно считать за предельную, т. е. за равную c. А если предельная скорость c известна из наблюдения, хотя бы с погрешностью $\delta(v)$, тогда значение k определится с крайнею простотою, потому что:

$$p = k\,\Delta M c^2,$$

а потому:

$$k = \frac{p}{\Delta M c^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (c)$$

В этом определении k, вследствие неточности $\delta(v)$ значения c будет погрешность, равная

$$\delta(k) = \frac{2k}{c}\,\delta(v).$$

Отсюда видно, что

$$\frac{\delta(k)}{k} = 2\frac{\delta(v)}{c};$$

т. е. относительная погрешность определения k вдвое превышает относительную погрешность предельной скорости; следовательно, если в определении предельной скорости мы делаем погрешность в сотую долю, значение k определится по (c) с точностью до пятидесятой доли значения k. Так как в практике, если уже достигнута скорость, близкая к c, можно определить равномерную скорость с большею степенью точности (стоит увеличить предел расстояний, между которыми определяется скорость), то определение k этим способом может быть очень точно, если только постоянная скорость достигается в пределах возможной точности

рассмотренном (v^2). Так, в нашем примере, если сопротивление пропорционально v^2, то с точностью 0.01 предельная скорость достигается чрез $1\frac{2}{3}$ сек., а если R пропорционально v, то по прошествии 2.6 сек. Для этого последнего случая, рассматриваемого далее по отношению зависимости t, h и c, зависимость t от v выражается равенством $t = \frac{c}{g}\ln\frac{c}{c-v}$, берущим начало из условия, что $\frac{dv}{dt} = g - \frac{k\,\Delta M v}{m}$, или, что все равно, $\frac{dt}{dv} = \frac{c}{gc - gv}$, потому что тогда $p = mg = k\,\Delta M c$.

наблюдения. А потому излагаемый способ и формула (*c*) дают надежный прием определения k, тем более, что при этом движение установилось, или *скорость постоянна*, и следовательно k относится с уверенностью к данному телу, данной жидкости и определенной скорости. Иными словами, применяя выражение (*c*), нам нет нужды знать точный закон изменения сопротивления с переменою скорости, и мы все же будем знать сопротивление, ибо оно = весу p. В пространстве же от $h=0$ до h_c скорость растет, изменяется, следовательно для вычисления k из наблюдений в этом пространстве необходимо предварительно знать закон изменения сопротивления со скоростью — иначе невозможно интегрирование, и если значение k переменно со скоростью, его нельзя, как то делается обыкновенно, признавать за постоянную, не зависящую от v, t и h. Пусть, например, окажется, что сопротивление растет не пропорционально v^2, а пропорционально некоторой $f(v)$, т. е. $R=\Delta Mf(v)$; все же, наблюдая предельную скорость c для данного тела при весе (в жидкости) p, мы найдем $p_1=\Delta Mf(c_1)$, а при другом весе $p_2=\Delta Mf(c_2)$ и т. д., откуда определим значения $f(v)$ при разных скоростях, т. е. узнаем вид и природу $f(v)$. Если, например, $f(v)=kv+k_1v^2$, то из наблюдений выведется значение k и k_1 с определенною степенью точности. Совершенно иное будет, если скорость непостоянна, т. е. наблюдаются величины, меньшие t_c и h_c. Тогда уверенность исчезает. Но иногда нельзя этого практически избегнуть, потому что нет в распоряжении достаточных расстояний и времен падения, чтобы достичь хоть приближенно постоянной скорости. Так, например, случай падения тяжелого тела в воздухе, когда движение, при обычных высотах, с которых производят опыт, еще далеко не становится равномерным.

Из сказанного видно, что для того, чтобы из *наблюдения* времен t и расстояний h сделать вывод о мере сопротивления k тела данной формы, есть два способа: 1) наблюдение времени t_0 начала падения и времени t_1, когда тело прошло от начала падения расстояние h, причем сопротивление выразится функциею от ускорения тяжести g, от времени t, которое $=t_1-t_0$, и от высоты h; 2) наблюдение окончательной или предельной скорости c, достигаемой, если не абсолютно, то с некоторою точностью, по прохождении расстояния h_c от начала падения, причем необходимо наблюсти h_2, h_3, h_4 . . . и соответственные времена t_2, t_3, t_4 . . . и увериться, что скорости постоянны, т. е. что в пределах точности наблюдения

$$\frac{h_2-h_3}{t_2-t_3}=\frac{h_3-h_4}{t_3-t_4}=\ .\ .\ .\ =c.$$

Первый способ должно считать общим, мы его и разберем далее, а второй страдает неуверенностью только тогда, когда нет

убеждения в достижении с точностью $\delta(v)$ предельной скорости c, но если найденные в опыте скорости v_2, v_3 . . . мало отличаются между собою, то они близки к c, но будут меньше c и дадут по формуле (c) и значение k больше действительного, а отнюдь не меньше действительности.

Если опыт, тем или другим путем произведенный, покажет, что при разных скоростях получается различное k, это будет значить, в сущности, что сопротивление пропорционально не квадрату, а иной степени. При том если k станет возрастать с возрастанием скорости, это будет значить, что сопротивление растет быстрее, чем квадраты скоростей, а если k окажется уменьшающимся со скоростью, то оно зависит от первой степени скорости или от функции $av+bv^2$ или от v_n, где $n>1<2$, или вообще от некоторой функции $f(v)$, а не от v^2. Так, зная k в предположении 1-й формулы, по наблюдению можно узнать и меру, и законы сопротивления, а следовательно и всякий другой *условный* способ выражения сопротивлений приведет к пониманию существа дела. Поэтому мы рассмотрим в применении к ускоренному движению или к началу падения применимость 1-й формулы, да еще, для примера, разберем применимость предположения, что сопротивление пропорционально первой степени скорости.

Начальное рассуждение, дающее решение условий падения тел в сопротивляющейся среде, может быть, мне кажется, проще всего выражено, исходя из того положения механики, что мерою сил служит сообщаемое ими *ускорение*, которое есть $\frac{d^2h}{dt^2}$ или вторая производная от проходимого пространства h по времени t, или оно равно $\frac{dv}{dt}$ = изменению (первой производной) скорости v[1] по времени t.

Ускорение при падении в жидкости будет очевидно равно ускорению g от действия будущего веса p без ускорения, зависящего от силы сопротивления. Но если ускорение от силы тяжести в жидкости действующее $g=\frac{p}{m}$, где m масса (которая найдется из веса в пустоте P, деленного на ускорение тяжести в пустоте $G=9.8$ . . . , т. е. $m=\frac{P}{g}$), то и ускорение, относящееся к сопротивлению, = самому сопротивлению (а оно выражается весом, как сказано на стр. 296) R, деленному на массу m. А потому

$$g-\frac{R}{m}=\frac{d^2h}{dt^2}=\frac{dv}{dt}.$$

---

[1] Которая сама есть изменение или первая производная проходимого пространства h по времени t или $v=\frac{dh}{dt}$.

Подставляя на место R его условное значение $R = k\Delta M v^2$ (или какое другое, напр. с v, а не v^2) и потом помножая обе части на m и замечая, что $mg = p$, получаем первое, основное уравнение

$$p - k\,\Delta M v^2 = m\frac{dv}{dt} = m\frac{d^2h}{dt^2}.$$

Так как $v = \frac{dh}{dt}$, а $\frac{dv}{dt} = \frac{d^2h}{dt^2}$, то получается дифференциальное уравнение, выражающее вполне зависимость h от t, а именно, принимая во внимание, что при достижении предельной скорости c ускорение $= 0$, т. е. $p - k\Delta Mc^2 = 0$, [1] откуда

$$k\,\Delta M = \frac{p}{c^2},$$

имеем:

$$p - \frac{p}{c^2}\left(\frac{dh}{dt}\right)^2 = \frac{d^2h}{dt^2}m$$

или, так как $\frac{p}{m} = g$, то лучше:

$$\frac{d^2h}{dt^2} = g - \frac{g}{c^2}\cdot\left(\frac{dh}{dt}\right)^2.$$

Двукратное интегрирование в пределах от $h = 0$ до некоторого определенного, конечного h доставляет, [2] имея в виду, что при $h = 0$, $v = 0$ и $t = 0$, следующую явную зависимость между c, h и t:

$$h = \frac{c^2}{g}\ln\left(\frac{e^{\alpha} + e^{-\alpha}}{2}\right) = 2.302\frac{c^2}{g}\lg\left(\frac{e^{\alpha}}{2} + \frac{1}{2e^{\alpha}}\right), \quad . \quad . \quad . \quad \text{(A)}$$

где ln есть знак натуральных (неперовых) логарифмов, lg знак обыкновенных (бригговых или десятичных) логарифмов, где затем основание неперовых логарифмов $e = 2.718$.

$$g = G\frac{p}{P} = \text{ускорение тяжести } \frac{\text{вес в жидкости}}{\text{вес в пустоте}},$$

---

[1] Это тождественно с (*c*) и служит как бы ему доказательством.

[2] Самое интегрирование дано во 2-м приложении, стр. 20 и 21. * Вся разность формул зависит от разности обозначений. То, что там означено чрез a здесь выражено c, а то, что там обозначено чрез g_1, здесь просто названо g то же, что в приложении названо g, то здесь обозначено G, и оно-то $= 9.8$ . . . м Кроме того, здесь вместо отрицательной степени прямо написана дробь и вместо неперова логарифма взят уже обыкновенный, зная, что неперов логарифм $\ln x = 2.302\lg x$.

* Из последнего уравнения, заменяя $\frac{dh}{dt}$ чрез v и интегрируя, получаем формулу (A), связывающую t и v, а заменяя в том же уравнении dt чрез $\frac{dx}{v}$ и интегрируя, получаем формулу (C) (см. то же примечание на стр. 419). (*Прим. ред.*)

$$c^2 = \frac{k\Delta M}{p},$$

$$\alpha = \frac{gt}{c} = G\frac{p}{P}\,t\sqrt{\frac{k\Delta M}{p}}.$$

Так как выражение (A) может быть представлено в форме:

$$gh = c^2 \ln\left(\frac{e^{\frac{gt}{c}} - e^{-\frac{gt}{c}}}{2}\right),$$

то очевидно, что переменными служат: gh, gt и c, т. е. что существует зависимость между окончательною, постоянною скоростью c и наблюдаемыми величинами gh и gt. Конечно, наблюдаются в указанных условиях только h и t, но g дается условиями опыта, потому что равно $G\frac{p}{P} = 9.82\,\frac{\text{вес в жидкости}}{\text{вес в пустоте}}$, а потому формула (A) дает, собственно говоря, неизвестную предельную скорость c по известным t, h и g, а когда c известна — величина k определится из равенства (c). Отсюда видно: 1) каждое тело по отношению к данной жидкости характеризуется тою предельною скоростью, которую оно может в ней достигать, и 2) что, определяя для данного тела t, h и g и наблюдая для него же предельную скорость c, можно испытать справедливость равенства (A) и следовательно предположение I, которое заключается в (A). Чтобы облегчить расчет и разыскание связи между gh, gt и c, приводим прилагаемую таблицу, по которой найдется при данных gt и c значение *gh в предположении сопротивления, пропорционального квадрату скорости*, принимая за t время от начала падения до расстояния h в секундах и выражая g, h и c в метрах.

Значения gt	Падение происходит в пустоте [1]	Если падение происходит в среде, сопротивляющейся пропорционально v^2, и если предельная скорость c равна					
		$c = 50$	40	30	20	10	1 м
10	$gh = 50$	$gh = 49.7$	49.5	49.1	48.0	43.4	9.307
20	200	194.9	192.2	186.7	173.5	132.5	19.307
30	450	424.4	413.2	390.3	342.2	230.9	29.307
40	800	726.9	693.9	636.6	530.0	330.7	39.307
50	1250	1084.5	1017.2	907.7	725.5	430.5	49.307

[1] Тогда $gh = \frac{(gt^2)}{2}$, потому что $h = \frac{gt^2}{2}$.

Так, например, если для данного тела, которого вес в пустоте $P = 2$ кг, а в жидкости вес $p = 1.5$ кг, наблюдено было там, где $G = 9.82$, что по истечении 5.506 сек. оно прошло 71.95 м от

начала падения, то из этого следует, что gt близко к 40, gh к 530, а потому предельная скорость этого тела близка к 20 м, как показывает таблица. Если $c=20$, то, зная p, Δ и M (поперечное сечение) по формуле (c), узнаем k. Для промежуточных значений hg, gt и c, не приведенных в таблице, можно применять интерполирование или пользоваться приближенною формулою (B), далее приводимою. Можно однако и прямо находить по опытным данным c или вообще сопротивление, пользуясь соображениями, которые излагаются вслед за сим и которыми далее я часто пользуюсь.

Формулу (A) можно представить в следующем виде, заменив в ней c^2 его значением, взятым из равенства $\alpha=\frac{gt}{c}$:

$$\frac{gh}{(gt)^2}=\frac{1}{\alpha^2}\ln\frac{e^{\alpha}+e^{-\alpha}}{2}=y.$$

Во второй части этого равенства находится только одна переменная α, следовательно численная величина y определяется вполне, с одной стороны, величиною α, а с другой — результатом наблюдения $\left(\text{выражается дробью } \frac{gh}{(gt)^2} \text{ или } \frac{h}{gt^2}\right)$, а потому для каждого наблюдения y известно, а из него найдется α, а следовательно и c, а потом и k. Поэтому расчет сводится на следующее: по данному численному значению $\frac{gh}{(gt)^2}$ или y следует найти соответственное значение α. Это дает прилагаемая далее таблица. Если же α известна, будет известно и c, потому что $c=\frac{gt}{\alpha}$, а когда c известно — легко узнать и k по уравнению $p=k\Delta Mc^2$, где p, Δ и M суть прямые данные опыта. Следовательно, надо иметь значения α и соответствующие им значения функции

$$\frac{1}{\alpha^2}\ln\frac{e^{\alpha}+e^{-\alpha}}{2}=y,$$

тогда из опытных данных легко извлечь значение c и k, характеризующих сопротивление падающего тела. Приводя таблицу соответственных значений α и y, заметим, что для пустоты c бесконечно велико, следовательно $\alpha=0$, а тогда $y=\frac{1}{2}$,

т. е.

$$\frac{gh}{(gt)^2}=\frac{1}{2}$$

или (что все равно)

$$h=\frac{gt^2}{2},$$

что и выражает закон падения в пустоте. Кривая, выражающая изменение y с переменою α, имеет некоторое сходство с цепною

линией и может быть названа *кадоидою* или *линиею падения* в среде. Опишем ее общую форму, считая α абсциссами и отлагая y ординатами. Кадоида или кривая падения[1] пересекает ось ординат при значении $\frac{1}{2}$, т. е. при $\alpha=0$ величина $y=0.5$. Это есть наибольшее значение y. Начиная отсюда, значение y все время убывает по мере возрастания α. Начиная от $\alpha=0$, кривая идет далее, представляя вогнутость, обращенную к началу координат. Но при некотором значении (около $\alpha=1.2$) абсциссы изгиб кривой меняется: ординаты продолжают все время уменьшаться по мере возрастания α, но кривая обращена к началу координат выпуклостью и таким образом кривая становится асимптотическою, причем ось абсцисс служит асимптотою, так что при больших значениях α значения y приближаются к нулю. Очевидно, что при больших α величина y меняется очень мало, а потому тогда нельзя пользоваться таблицами, определяющими зависимость y от α. Но тогда есть возможность очень просто вести весь расчет, потому что тогда (при больших α) член $e^{-\alpha}$, стоящий под знаком логарифма, ничтожно мал сравнительно с членом e^{α} и тогда вместо y можно взять $\frac{1}{\alpha^2}\ln\frac{e^{\alpha}}{2}$, а это выражение равно $\frac{1}{\alpha}-\frac{\ln 2}{\alpha^2}$, а потому тогда весь расчет прост, как мы и покажем далее.

Поэтому мы приводим в прилагаемой таблице значения y и $\lg y$ только для малых α. Особый интерес имеют только эти значения, потому что $\alpha=\frac{gt}{c}$, а при падении в воздухе тяжелых тел предельные скорости c велики, времена же t малы,[2] а потому α мало. При падении в воде, напротив того, обыкновенно α велико, потому что c мало, а потому наблюдаемое чрез некоторое расстояние h значение t велико. Если $\alpha=4$, то $e^{\alpha}=54.60$, а $e^{-\alpha}=0.02$, а потому при большем значении α и при обычной точности определений t, когда можно подозревать погрешность, равную $0.001\,t$, можно уже пренебрегать значением числа $e^{-\alpha}$.

Приводим поэтому значения ординат кадоиды или y и логарифмы[3] их только для значений α от $\alpha=0$ до $\alpha=4$ чрез каждую десятую долю, и только для ясного понятия о кривой приводим величины y до величины $\alpha=10$, но тогда только чрез каждую единицу. Значение ординат для α большего, чем $\alpha=10$, так малы,

---

[1] Мы разбираем только ту часть кадоиды, которая имеет физическое значение при падении, т. е. отвечает положительным абсциссам. При всплывании g и c отрицательны, а потому α также положительная.

[2] Нельзя делать наблюдений при больших t, потому что в опытах нельзя располагать большими высотами h, которые тогда должны получиться. Падение тел с аэростатов, однако, могло бы восполнить этот недостаток.

[3] При помощи логарифмов y во многих случаях удобнее находить промежуточные значения α.

напр. $\alpha = 100$, $y = 0.00993$, и изменяются так последовательно, притом тогда $e^{-\alpha}$ столь ничтожно пред e^{α}, что их вовсе нет нужды приводить.

Значение координат кадоиды, которой уравнение есть:

$$y = \frac{1}{\alpha^2} \ln \frac{e^{\alpha} + e^{-\alpha}}{2}$$

		Разность		Разность
$\alpha = 0.0$	$y = 0.50000$		$\lg y = 0.69897 - 1$	
		-84		-74
0.1	0.49916		0.69823 — 1	
		-245		-213
0.2	0.49671		0.69610 — 1	
		-404		-354
0.3	0.49267		0.69256 — 1	
		-546		-485
0.4	0.48721		0.68771 — 1	
		-675		-605
0.5	0.48046		0.68166 — 1	
		-786		-717
0.6	0.47260		0.67449 — 1	
		-878		-814
0.7	0.46382		0.66635 — 1	
		-952		-900
0.8	0.45430		0.65735 — 1	
		-1006		-974
0.9	0.44424		0.64761 — 1	
		-1046		-1034
1.0	0.43378		0.63727 — 1	
		-1069		-1084
1.1	0.42309		0.62643 — 1	
		-1081		-1123
1.2	0.41228		0.61520 — 1	
		-1080		-1154
1.3	0.40148		0.60366 — 1	
		-1073		-1176
1.4	0.39075		0.59190 — 1	
		-1055		-1189
1.5	0.38020		0.58001 — 1	
		-1035		-1199
1.6	0.36985		0.56802 — 1	
		-1010		-1202
1.7	0.35975		0.55600 — 1	
		-981		-1201
1.8	0.34994		0.54399 — 1	
		-951		-1196
1.9	0.34043		0.53203 — 1	
		-918		-1187
2.0	0.33125		0.52016 — 1	
		-886		-1178
2.1	0.32239		0.50838 — 1	
		-854		-1165

		Разность		Разность
$\alpha = 2.2$	$y = 0.31385$		$\lg y = 0.49673 - 1$	
		— 821		—1151
2.3	0.30564		0.48522 — 1	
		— 789		—1137
2.4	0.29775		0.47385 — 1	
		— 758		—1120
2.5	0.29017		0.46265 — 1	
		— 728		—1103
2.6	0.28289		0.45162 — 1	
		— 698		—1086
2.7	0.27591		0.44076 — 1	
		— 671		—1068
2.8	0.26920		0.43008 — 1	
		— 643		—1051
2.9	0.26277		0.41957 — 1	
		— 617		—1033
3.0	0.25660		0.40924 — 1	
		— 593		—1015
3.1	0.25067		0.39909 — 1	
		— 570		— 997
3.2	0.24497		0.38912 — 1	
		— 546		— 980
3.3	0.23951		0.37932 — 1	
		— 526		— 963
3.4	0.23425		0.36969 — 1	
		— 504		— 947
3.5	0.22921		0.36022 — 1	
		— 486		— 929
3.6	0.22435		0.35093 — 1	
		— 467		— 913
3.7	0.21968		0.34180 — 1	
		— 449		— 897
3.8	0.21519		0.33283 — 1	
		— 432		— 882
3.9	0.21087		0.32401 — 1	
		— 418		— 867
4.0	0.20669		0.31534 — 1	

		Разность			Разность
		— 662			— 247
$\alpha = 1$	$y = 0.4338$		$\alpha = 6$	$y = 0.1474$	
		—1025			— 187
2	0.3313		7	0.1287	
		— 747			— 145
3	0.2566		8	0.1142	
		— 499			— 117
4	0.2067		9	0.1025	
		— 346			— 94
5	0.1721		10	0.0931	
		— 247			— 79

Так как при падении e^{α} всегда более единицы (потому что $\frac{gt}{c} > 0$), то член e^{α} будет больше влиять на результат, чем $e^{-\alpha}$, которое будет всегда меньше единицы и следовательно меньше e^{α}, а потому для приближенного значения функции падения найдем сперва (по предшествующим способам расчета или прямо по опыту) приближенное значение c_1 и подставим его в наше основное уравнение только для определения $e^{-\alpha}$. Величина эта будет тогда известною. Назовем ее чрез N.

$$N = e^{-\alpha} = \frac{1}{e^{\alpha}}, \text{ где } \alpha = \frac{gt}{c}.$$

Тогда основное уравнение примет вид:

$$\frac{gh}{c^2} = \ln\left[\frac{e^{\frac{gt}{c}} + N}{2}\right] = \ln e^{\frac{gt}{c}} + \ln\,(1 + N^2) - \ln 2.$$

А отсюда следует, что:

$$\frac{gh}{c^2} + 0.6931 - 2.303 \lg\left(1 + N^2\right) = \frac{gt}{c} \ldots\ldots \text{(Bv)}$$

Считая $\frac{1}{c} = \sqrt{\frac{kM}{p}}$ неизвестною, имеем квадратное уравнение, из которого определится c, а следовательно и k, более точно, чем приближенное c_1. Так можно приблизиться к истинному c. Но расчет еще более упрощается, когда $\frac{gt}{c}$ или α велико (более $\alpha = 4$ или 5), что будет или тогда, когда t велико (это случай, практически редкий), или когда c мало и гораздо менее gt, т. е. когда предельная скорость мала, а так как $c^2 = \frac{p}{kM}$, то это будет не иначе, как при малом весе тела, погруженного в жидкость и при большом его сопротивлении, напр. при падении легких тел в воздухе или при падении в тяжелых жидкостях. Тогда в пределе обычных точностей наблюдения вместо гиперболической формулы (A), очень неудобной для прямого расчета неизвестной величины k, можно с полным правом под знаком логарифма оставить только один большой член, содержащий e^{α} в числителе, а второй малый член, где эта величина e^{α} в знаменателе, отбросить. Конечно, чрез это значение k возрастет, но в такой малой степени, что в обычных условиях опытов разность полного и сокращенного выражения не будет превосходить возможные погрешности опытов, если предельная скорость c мала, как мы и покажем далее над одним примером.[1] Но если α мало,

[1] Уже при $\alpha = 3$ значение $e^{-\alpha}$ составляет такую малую долю от значения e^{α}, что в обычных пределах точности первым можно пренебречь сравнительно со вторым.

что будет, когда t и Δ малы или p и c велики, напр. при падении тяжелого тела в воздухе, тогда следует рассчитывать k по (А). Если же отбросить второй член под знаком lg и произвести в (А) соответственные подстановки и упрощения, то значение k определяется очень легко из равенства:

$$x^2 - \frac{t}{h}x + 0.6931\,\frac{1}{gh} = 0$$

или

$$x^2 - \frac{t}{h}\,x + 0.07058\,\frac{P}{ph} = 0, \quad \ldots\ldots\ldots \quad (B)$$

в котором значение G для выражения $g = G\,\frac{p}{P}$ принято равным $G = 9.82$, а

$$x = \sqrt{\frac{k\Delta M}{p}}.$$

Выражение (В) менее точно, чем (А), но расчет много проще.

Разрешая предшествующее уравнение, т. е. находя x, разлагая затем корень $\sqrt{1 - \frac{0.2823\,h}{t^2}\cdot\frac{P}{p}}$ в строку, которая будет сходящеюся при вышепринятом условии, что c мало, и притом когда (случай падения легкого тела в воде) $\frac{h}{t^2}$ есть малая дробь взяв одни первые члены, имеющие наибольшее значение, получим:

$$x = \frac{1}{c} = \sqrt{\frac{k\Delta M}{p}} = \frac{t}{h}\left(1 - \frac{0.07058\,h}{t^2}\,\frac{P}{p}\right).$$

Возвышая в квадрат и опять отбрасывая мало значущий квадрат второго члена второй части, получим, наконец, простейшее приближенное значение:

$$k = \frac{p}{\Delta M}\,\frac{t^3}{h^2} - 0.141\,\frac{P}{h\Delta M} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (C)$$

Очевидно, что выражение (А) дает k точно, а (С) только в грубом приближении, и что можно остановиться на любом из промежуточных приближений. На частном примере, взятом случайно из ряда наблюдений, произведенных зимою 1879—1880 г. г-жею М. Л. Гроссман и мною, можно легко убедиться в степени приближения, доставляемой в соответственных условиях таким простым расчетом, т. е. выражением (С). Замечу при этом, что при действительных опытных исследованиях, когда надо делать много и часто расчет опытных данных, чрезвычайно важный элемент верности направления работы составляет удобство прилагаемых формул, потому что расчет по сложным, хотя бы и точным, формулам не только продолжителен, но, что гораздо важнее, часто

сопряжен с погрешностями счета, которые всякий знает, кто занимался рассчислением сложных и многочисленных наблюдений. Поэтому-то я и старался разыскать для определения величины k в том частном случае (медленное падение легкого тела), какой часто бывает в опытах, такую формулу, которая как (C), рассчитывается легко и быстро. Притом первый член ее имеет прямое физическое значение, потому что, если бы в опыте сразу была достигаема постоянная скорость c, то она была бы равна $\frac{h}{t}$ (*это было бы с некоторою погрешностью достигнуто для тел с малым* p, если бы h было очень велико), а мы знаем, что $p = k\Delta Mc^2$, а отсюда $k = \frac{pt^2}{\Delta Mh^2}$, т. е. получается значение первого члена в выражении (C). Второй член имеет поэтому смысл поправки, зависящей от того, что равномерная скорость еще далеко не достигается, но, конечно, чем меньше P и чем больше h, тем второй член меньше и, следовательно, тем ближе опытная скорость к предельной.

Наши определения делались в воде, налитой в цилиндрическом цинковом сосуде, снабженном вмазанными стеклами, *служащими для наблюдения времен падения; разрез сосуда эллиптический*, большая ось 400, малая 250 мм. Падал латунный шар, диаметром в 40.0 мм, след. $M = 0.001282$ кв. м. Температура воды 10°.5 Ц, а потому плотность воды $\Delta = 99.7$ кг. Вес шара в воздухе 34.990 г. Вес в пустоте или $P = 0.03503$ кг. Вес в воде или движущий вес $p = 0.000854$ кг. Считая от начала падения, времена прохождения падающего шарика наблюдались на расстояниях: 0.4, 1.0 и 1.6 м. Притом сперва делались наблюдения от 0 до 1.4 м, потом от 0.4 до 1.0 м затем от 1.0 до 1.6 м; в сумме получается данное от 0 до 1.6 м. Времена (число секунд по ручному хронографу) прохождения этих расстояний определялись по 5 раз, и результат был:

	От 0 до 0.4 м.	От 0.4 м до 1.0 м	От 1.0 до 1.6 м.	В сумме от 0 до 1.6 м
	3″.1	4″.0	3″.6	10″.7
	3″.0	4″.0	3″.8	10″.8
	2″.9	3″.8	3″.6	10″.3
	3″.0	4″.0	3″.5	10″.5
	3″.0	3″.8	3″.55	10″.35
Среднее	3″.00	3″.92	3″.61	10″.63
Скорость средняя . . .	0.133 м	0.153 м	0.161 м	0.152 м

Приведенные скорости показывают, что после прохождения 1 метра скорость еще возрастает, хотя и мало, в пределе возможных погрешностей опыта. Так как по формуле (*a*), считая $c = 0.16$, $\delta(t) = 0.1$; $\delta(h) = 0.01$, а потому $\delta(v) = \frac{0.01}{3.6} + \frac{0.16 \cdot 0.15}{3.6} =$

$=0.01$, предельная скорость (в предположении пропорциональности сопротивления квадрату скорости) должна достигаться с точностью до 0.01 м через $t_c = 0.1175 \frac{35.03}{0.854} 0.16 \lg \frac{2 \cdot 0.16}{0.01} =$ $= 1''.20$. В действительности после первых трех секунд скорость различается не более, как на 0.161 от 0.153, т. е. на 0.008. Поэтому последнюю наблюденную скорость $=0.161$ можно считать близкою к предельной и принять $c=0.16$. Но надо было в том убедиться, потому что в действительности на пути от 1 до 1.6 м скорость оказалась большею, чем на пути от 0.4 до 1.0 м. Для этой цели шарик вынимался немного из воды так, чтобы его вершина была выше уровня, и тогда опускался. Чрез это он приобретал в воде с самого начала бóльшую скорость, чем предельная, и эта высшая скорость должна была убывать по мере падения, а в конце его достигать до предельной возможной скорости c. При разных начальных погружениях (от $\frac{1}{4}$ до $\frac{3}{4}$ шара над водою при начале падения) получены следующие числа:

h от 0.4 до 1.0 м	$t = 3''.8, 3.7, 3.9, 4.0, 3.7, 3.8$
h „ 1,0 „ 1.6 „	$t = 3''.5, 3.5, 3.8, 4.0, 3.5, 3.6$

Среднее время для первого промежутка $=3''.82$, а для второго промежутка $= 3''.65$, а потому скорость из 0.156 переходила в 0.164[1], а в среднем была 0.160, именно такая, какую можно было ждать, судя по вышеприведенным опытам падения погруженного шарика. Если бы не была достигнута ни в том, ни в другом ряде предельная скорость, то первый ряд дал бы меньшую, чем c, скорость, а последний бóльшую, чем c, согласие же результата дает уверенность, что предельная скорость c в самом деле близка к 0.16.

Приняв 0.16 за предельную скорость, по формуле (c) находим, что

$$k = \frac{0{,}000854}{999.7 \cdot 0{,}001282 \cdot (0.16)^2} = 0.0251.$$

Из данных опыта очевидно, что средняя возможная погрешность в определении времен не меньше $\delta(t) = 0''.2$, а потому, если даже $\delta h = 0$, то в определении скорости возможна погрешность $\delta(v) = v \frac{\delta t}{t}$, а потому, если $t=7.5$ (время для пути от 0.6 до 1.6 м) и $\delta(t) = 0.2$, то при $c=0.16$, значение $\delta(v) = 0{,}0043$, а отсюда погреш-

[1] Если бы опыт был более точен, то очевидно, что в первом промежутке должна быть скорость больше, чем во втором. Та разность 0,008 м, которая здесь наблюдается, находится, очевидно, в пределе возможных погрешностей. Средняя скорость из обоих рядов для двух промежутков есть 0.1585. Принимая $c = 0.16$, мы мало удаляемся от среднего результата.

ность, возможная в k или $\delta(k)=\frac{2k}{c}\delta(v)=0.0014$, т. е. составляет не менее 5%. Другими словами, уже чрез 3 сек. и на расстоянии 0.41 м от начала падения скорость становится почти постоянною и не различается, вероятно, от предельной более, как на 0.005 м, а при такой точности определяется k с точностью до 5% его значения, а потому при скорости 0.16 для нашего шарика значение k находится в пределе от 0.0265 до 0.0238. Это значение k отвечает сопротивлению воды и шару диаметра $d=0.04$ м, при скорости $v=0.16$, что и выражаем условно так:

$$\text{Вода: } \frac{\text{шар}}{d=0.04\text{ м}},\ k=0.0251 \text{ кг при } v=0.16 \text{ м}.$$

Для шаров близкого размера и для близких и равномерных скоростей сопротивление можно рассчитывать, пользуясь этим значением k, в иных же условиях не иначе, как после убеждения в верности формулы (1) сопротивления. Для того же, чтобы убедиться в этом отношении, воспользуемся вышеприведенными средствами. Для примера беру данные всего пройденного пути, начиная от $h=0$ до $h=1.6$. Тогда $t=10.53$; $h=1.6$, $\frac{p}{\Delta M}=0.000667$, $g=0.2395$, $\frac{P}{\Delta M}=0.0274$, а потому по (A) или по (B) или по (C) получается $k=0.0265$. Менее полные формулы (B) и (C) дают то же значение k, как и грубое приближение по (C), потому что величина $\alpha=\frac{gt}{c}$ здесь близка к 16 и e^{α} составляет величину более 10 миллионов, а потому $e^{-\alpha}$ или $\frac{1}{e^{\alpha}}$ ничтожно малая дробь. Пользуясь наблюдением $h=0.4$, $t=3.''00$, получаем $k=0.0280$. Для промежутка от $h=0$ до $h=1.0$, $t=3.00+3.92=6''.92$, а потому $k=0.0281$, почему из наблюдения над временем падения, считая от его начала, выводится k, большее (от 0.0265 до 0.0281) чем из наблюдения предельной скорости ($k=0.025$). Но так как при начале падения скорость=0, то момент начала падения трудно наблюдать, и если предположить, что вначале делается погрешность, увеличивающая t на 0''.2, то замеченное различие исчезает. Так, например, если для первого промежутка $h=0.4$ принять $t=2.8$ вместо 3''.0, то получится $k=0.0233$ вместо действительно полученного 0.0280, следовательно различия значений k, полученные из разных наблюдений, *здесь* входят в пределы возможных погрешностей наблюдения или в этих пределах формулы (1) и выводимая по ней (A) выражают закон сопротивления и падения в сопротивляющейся среде.

Из всего этого видно, что при изучении законов сопротивления особенно важное значение имеют числа, полученные при скорости, сделавшейся в пределах точности наблюдения по-

стоянною, но могут быть применяемы и начальные наблюдения, пользуясь законом $p=\Delta kMv^2$. Достоинство же результата (k) зависит, конечно, от точности наблюдения как предельных скоростей, так и вообще величин h и t. Вывод этот подтверждается при разборе следствий того допущения, что сопротивление пропорционально первой степени скорости.

Если сопротивление выражается не 1-ю формулою, содержащею v^2, а находится в иной зависимости от v, то эту зависимость легко найти, изменяя вес данного тела без изменения его наружных форм и наблюдая веса p_0 и $p_1 \ldots p_i$ и соответствующие им предельные скорости $v_0, v_1 \ldots v_i$, потому что тогда вес равен сопротивлению и зависимость p от v есть зависимость сопротивления от скорости. Когда для наблюдения приходится брать начальные части пути падения, где скорость еще изменяется, тогда расчет постоянного коэффициента k сопротивления от скорости требует знания закона, связывающего R с v. Для примера рассмотрю следствия, вытекающие из допущения, что $R=k_1\Delta Mv$, т. е. когда сопротивление принимается зависящим от первой степени скорости, как это допускается для поверхностного сопротивления (трения) параллельных плоскостей при малых скоростях. Основное уравнение, соответствующее ускорению и тому равенству, которое дано на стр. 396, будет тогда

$$g-\frac{k\Delta M}{m}=\frac{dv}{dt}=\frac{d^2v}{dt^2}.$$

А из него, чрез двукратное интегрирование в пределе от $h=0$ до некоторого определенного h, выводится[1] значение h, подобное тому, которое дано (A); а именно, так как при $h=0$ величина v или $\frac{dh}{dt}=0$ и так как при обозначении (опять) предельной скорости чрез c:

$$p=k_1\Delta Mc;\quad g=9.82\,\frac{p}{P};\quad m=\frac{p}{g},\ \alpha=\frac{gt}{c},$$

получается:

$$h=ct-\frac{c^2}{g}\left(1-\frac{1}{e^{\alpha}}\right)\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ (D)$$

Если время t велико, а предельная скорость c мала, то дробь, стоящая в скобке, мала, а потому тогда, после допущений

[1] Вывод этой и др. подобных формул сопротивления будет помещен моим товарищем и другом, проф. Д. К. Бобылевым, в приготовляемой им к печати „Аналитической механике". Обязательное содействие, оказываемое мне часто Д. К. Бобылевым, многократно облегчало мне разрешение многих математических и механических вопросов.

подобных тем, какие мы приняли при переходе от (A) к (C), получается:

$$k_1 = \frac{p}{\Delta M}\frac{t}{h} - 0.102\frac{P}{t\Delta M}\ ^1 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (E)$$

Применяя эти формулы к вышеразобранным (стр. 432—433) наблюдениям, получаем:

1) $c=0.16$ . . . . . $k_1=0.00417$
2) $h=1.6$; $t=10.53$ . . . . . $k_1=0.00412$
3) $h=1.0$; $t=6.92$ . . . . . $k_1=0.00421$
4) $h=0.4$; $t=3.00$ . . . . . $k_1=0.00407$

Из этого видно, что наблюдения, по крайней мере такие, которые сопряжены с довольно значительными погрешностями, над временами падений данного тела,—могут быть с таким же удобством рассчитываемы при допущении пропорциональности сопротивления первой степени скорости, как и при допущении закона v^2. Более тонкие наблюдения, однако, могут и здесь дать ответ положительный между предположением v или v^2, как видно из прилагаемой таблицы, рассчитанной по равенству (D) и совершенно соответствующей вышеприведенной (стр. 425) таблице, рассчитанной по (A):

Значениям gt	Падение происходит в пустоте	Если падение происходит в среде, сопротивляющейся пропорционально v, и если предельная скорость c равна:					
		$c=\infty$	40	30	20	10	1 м
10	$gh=50$	$gh=46.9$	46.1	44.9	42.6	36.8	9.00
20	200	175.8	170.4	162.1	147.2	113.6	19.07
30	450	372.0	355.8	331.1	289.2	205.0	29.00
40	800	623.3	588.6	537.2	454.1	301.8	39.00
50	1250	919.7	858.0	770.0	633.0	400.7	40.00

Из сличения с таблицею, данною на стр. 425, видно, что при одних и тех же предельных скоростях, при допущении закона v, проходимые пути в данное время всегда меньше, чем пути, проходимые в то же время, если сопротивление пропорционально v^2, т. е. предельная скорость достигается при законе v^2 скорее,

---

[1] Уже из одного сравнения равенств (C) и (E) видно, что если мы выразим сопротивление в n-ой степени скорости:

$$R = k\,\Delta M v^n,$$

то приближенное значение k получится, когда от $\frac{d}{\Delta M}\left(\frac{t}{h}\right)^n$ отнимается $\frac{P}{\Delta M}$, умноженное на тем меньшую величину, чем h и t будут больше, т. е. чем больший путь пройдет тело и чем скорость его будет меньше.

чем при законе v. А потому тщательное наблюдение начальных скоростей может решить, по которому из двух законов происходит падение, даже тогда, когда предельная скорость не известна по опыту. Но хотя теоретически это возможно, практически очень трудно достижимо. В самом деле, при падении легкого тела p и g мало, и предельная скорость достигается очень скоро, а потому в это краткое время нельзя сделать точных наблюдений, а если p велико и g близко к 9.8, т. е. Δ мало, как, например, при падении в воздухе, тогда можно наблюдать начальные скорости; а предельные достигаются на таких расстояниях, которые недоступны для измерения. Возьмем для примера такой воображаемый случай, когда $g = 9.0$, и пусть по истечении $\frac{50}{9}$ секунд пройдено пространство 101.5 м с точностью наблюдения даже очень значительною — 1 м. Эту точность действительно должно назвать большою, потому что она отвечает погрешности в $\frac{1}{30}$ сек., считая от начала падения, а такую погрешность, особенно для момента начала падения, сделать легко даже при точнейших измерительных приборах (напр. при регистрирующих или самопишущих хронографах). Если из двух (по A и D) таблиц возьмем соответственные данные, то увидим, что:

Чрез	$\frac{10}{9}$	$\frac{20}{9}$	$\frac{30}{9}$	$\frac{40}{9}$	$\frac{50}{9}$ сек.
По (A) . . . $h = 5.45$	20.74	43.37	70.40	100.86	
По (D) . . . $h = 5.21$	19.53	41.22	69.26	102.19	

Отсюда видно, что пути, проходимые в те же времена в обоих случаях близки, а именно: сначала по закону v^2 они больше, потом же при допущении закона v,[1] но различия так малы, что опыт тут мало что может решить. Иное дело, если бы наблюдались окончательные скорости, потому что указанные числа отвечают в первом ряде предельной скорости $c = 30$ м, а во втором ряде предельной скорости $c = 50$ м; но эти скорости даже для первого ряда (формулы a и b) достигают только чрез $t_c = 6.8$ сек. на расстоянии $h_c = 130$ м от начала падения, если точность в определении скорости = 1 м. Практически это достижимо с трудом. Но изменение веса одного и того же тела дает полную возможность решить вопрос очень просто, особенно тогда, когда могут быть достигнуты предельные скорости. Так, напр., тот самый шар, данные для подъема которого в воде приведены выше, на стр. 432, при изменении веса представляет следующие предельные скорости, наблюденные

[1] Повидимому, пропущены слова „они меньше". (*Прим. ред.*)

М. А. Гроссман тем же способом, как и в вышеуказанном примере:

Вес в воде	$p = 0.396$	0.854	1.434	2.737 г
Предельная скорость .	$c = 0.110$	0.160	0.203	0.283 м в 1″

Чтобы узнать, какой степени скорости пропорционально сопротивление (здесь оно $= p$), руководствуясь формулою (1), находим значения $\frac{p}{c^2}$, которые должны быть величиною постоянною $= k\,\Delta M$, если сопротивление действительно пропорционально квадрату скорости. В самом деле из наших опытных данных имеем:

$$\frac{p}{c^2} = 32.7 \quad 33.4 \quad 34.8 \quad 34.2$$

Если бы формула $R = k_1 \Delta M v_0$ была более справедлива, т. е. если бы сопротивление было пропорционально первой степени скорости, то постоянно было бы частное $\frac{p}{c}$, а в действительности оно оказывается быстро возрастающим со скоростью:

$$\frac{p}{c} = 3.60 \quad 5.34 \quad 7.06 \quad 9.67$$

А потому несомненно: 1) что сопротивление в действительности ближе к пропорциональности с v^2, чем с v, а потому расчет по (1) и по (A), (C), (*c*) надежнее для вывода законов, чем по каким-либо другим формулам (напр. D, E), и 2) что наблюдения при постоянных, предельных скоростях во всех отношениях более поучительны и скорее могут служить для решения задач сопротивления, чем наблюдения, произведенные при начале падения и при неустановившемся движении. Это необходимо иметь в виду, пользуясь падением для определения сопротивлений.

После этих общих замечаний обратимся к отчету о тех измерениях сопротивлений, какие получаются из наблюдений над *временами падения*.

Первые ясные и связные представления, относящиеся к влиянию сопротивления на скорость падения, сколько мне известно, высказаны были раньше Ньютона Мариоттом в середине XVII столетия в сочинении „Traité de la percussion ou choc des corps, dans lequel les principales règles du mouvement sont expliquées et demonstrées par leur veritables causes“.[1] Так, Мариотт

[1] Сочинение это (не знаю, когда оно явилось в первый раз) известно мне по лейденскому изданию (Pierre Vander) 1717 г., где собраны после смерти все произведения Мариотта, перепечатанные с прежних, лучших и полнейших. Эту книгу вместе с сочинениями Бойля нельзя не рекомендовать как поучительные для истории физических наук того времени. Я думаю, что всякий

знал, что каждое тело, падающее в воздухе и всякой другой жидкости, приобретает некоторую определенную, предельную скорость, и дал правила для ее расчета. Свинцовый шар (пуля), в 6 линий диаметром, по примерному расчету Мариотта, приобретает, после 9—10 сек. падения, пройдя около 900—1000 фут., постоянную скорость около 140 фут. в секунду. Опытные основания этого расчета приводятся далее, но мне кажется нелишним тотчас найти из этого данного то значение k, которое ему отвечает, пользуясь уравнением (*c*). Диаметр=1.354 см, вес куб. сантиметра употребленного свинца Мариотт принимает равным 11.0 г, а потому $p=0.0143$ кг, плотность воздуха принимаю $\Delta=1.22$, сечение $M=0{,}000144$ кв. м, предельная скорость, по Мариотту, $c=45.5$ м. Откуда по (*c*) значение $k=0.039$. Позднейшие наблюдения, как увидим далее, дают для шаров в большинстве случаев числа меньшие, чем 0.04, однако близкие к 0.04, но здесь скорости велики, а при бо́льших скоростях k растет. Уже из этого примера видно, как высоко надо ценить данные такого наблюдателя, как Мариотт.

Переходя от скоростей падения свинцового шара к временам падения воскового, пробкового, золотого и водяного (капель) шаров того же диаметра, Мариотт пользуется своим 25-м предложением, которое может быть выражено так: квадраты предельных скоростей, достигаемых при падении тел одинаковых по форме (размерам), но различных по плотности, находятся в отношении плотностей.[1] Такое и многие другие положения ясно показывают, что в средине XVII столетия, раньше Ньютона, твердо понималась уже пропорциональность сопротивления с квадратом скорости, потому что указанное положение есть одна из форм его выражения, соответствующая 1-му равенству или (*c*). Действительно, для предельной скорости c вес $p=$ =объему на плотность=сопротивлению, а потому, если w есть общий объем и M общий мидель, а D и D_1 разные плотности тел, c и c_1 разные их предельные скорости: $w\,D=k\Delta Mc^2$ для одного тела и $wD_1=kDMc_1{}^2$ для другого тела, а потому $c^2:c_1{}^2=D:D_1$, что и утверждал Мариотт. Отсюда он выводит пре-

будет читать их с удовольствием, как и более поздние сочинения Дю-Бюа, Лавузье и т. п., потому что ясность метода, важность и простота постановки опытов и вопросов, без чопорного чванства иных мудрецов—делают эти книги образцовыми для направления, принятого естествознанием в два предшествующие нам века.

[1] Мариотт так формулирует свою XXV теорему: „Les corps égaux en volume semblables et semblablement posés et de pesanteurs inégales, acquièrent en tombant à travers l'air des vitesses complettes, qui sont l'une à l'autre selon la raison sous doublée de leur poids". В задачах и опытах, описываемых вслед за тем, это правило уясняется, и мне казалось наиболее ясным придать теореме Мариотта вышеприведенную форму, в которой смысл предложения становится очевидным.

дельные скорости шаров различного вещества, а затем для данного вещества и шаров разного диаметра. Далее Мариотт предлагает способы производства наблюдения и описывает свои опыты, произведенные в сквозном свободном пространстве винтовой лестницы с башни в подвалы парижской обсерватории. Наблюдатель держит между двумя пальцами два шарика, и они выпускаются одновременно. Один падает, а другой есть полусекундный маятник, дающий возможность сосчитать время, прошедшее до того момента, когда слышен звук упавшего шарика, происходящий от удара о звучное препятствие, поставленное на определенном расстоянии от точки начала падения. Делается поправка на скорость звука, считая скорость его равною 1080 парижских футов. Полученные данные суть:

	Диаметр	Высота h	Время исправлено	Плотность к воде	
1) Свинцовый шар .	6 линий	166.5 фут.	3.62 сек.	11.0	$c = 140.0$ фут.
2) Он же	—	87.5	2.58	11.0	—
3) *Восковой шар*[1] .	6	126.5	4.09	1.0	43.5
4) Он же	—	71.0	2.66	1.0	—
5) Пробковый шар	6	71.0	4.00	0.25	22.0
6) Восковой шар .	8	71.0	2.47	1.0	—
7) Пробковый шар	12	71.0	3.25	1.24	31.0

[1] *В нем немного песку, чтобы сделать плотность равною воде.*

В последнем столбце дана предельная скорость, принятая Мариоттом на основании многих, точнее не описываемых им, опытов и соответственных расчетов. Вот эту-то предельную скорость лучше и удобнее всего принять для определения k, судя по соображениям, развитым на предшествующих страницах. При этом делаем все переводы к метрической системе, находим движущий вес p по плотности, данной Мариоттом; пользуемся формулой (*c*) и принимаем для воздуха $\Delta = 1.22$ (у Мариотта не дано ни давления, ни температуры); эта плотность отвечает давлению 760 мм и температуре 15° Ц.

№ опыта	Вес, кг	Сечение, кв. м	Предельная скорость, м	По формуле (*c*)
1 и 2	$p = 0.01430$	$M = 0.000144$	$c = 45.5$	$k = 0.039$
3 и 4	0.00130	0.000144	14.1	0.037
5	0.00032	0.000144	7.1	0.036
7	0.00260	0.000576	10.1	0.036

Из этих чисел видно, что k растет со скоростью. Но не надо забывать, что значения c прямо в наблюдениях Мариотта не получались, а потому содержат уже в себе некоторые предположения, а потому, если бы полнота и качество наблюдений Мариотта заслуживали бо́льшего доверия, чем последующие наблюдения подобного же рода, следовало бы из прямых данных опыта, при помощи равенства (A), определить значения k. Но мы этого не делаем потому особенно, что главное данное, необходимое для расчета, а именно вес (p) в жидкости (здесь в воздухе) у Мариотта не дан, и его приходится находить предположительно, по размерам и плотностям шаров, а это сомнительно.[1]

Интерес определения Мариотта состоит в том, что его опыты относятся к XVII столетию, первые между рядом дальнейших предшествуют опытам Ньютона и рассчитаны самим Мариоттом на основании закона квадратов скоростей, что показывает ясно известность этого закона раньше Ньютона, к опытам которого мы теперь и перейдем.

Ньютон, изложив свою теорию сопротивления (приложение 1) и приложив ее к шарообразным телам, во 2-й книге (De motu corporum liber secundum) своего бессмертного сочинения „Philosophiae Naturalis Principia Mathematica“[2] в самом конце Sectio VIII (De motu fluidorum et resistentia projectilium) описывает свои опыты над определением времени падения шаров в воде и воздухе. Первые 12 опытов относятся к воде, два последних к воздуху. Оба эти ряда опытов мы опишем отдельно, потому что их условия и способ вывода из них значения k весьма различны.

В квадратном деревянном сосуде (размеры 9 на 9″ в поперечнике и $9^1/_2$ фут. глубины) была налита дождевая вода (вес куб. фута ее Ньютон считает 76 римских фунт. и куб. дюйма =

---

[1] Для опыта 1-го: $g = 9.81$ м, $t = 3''.62$, $h = 9.81$ м, $t = 52.8$ м,* а потому ордината кадоиды y или $\frac{h}{gt^2} = 0.434$, откуда (по таблице координат кадоиды) $\alpha = 1.00$, следовательно $c = \frac{gt}{\alpha} = 35.5$ м, а не 45.5, как считает Мариотт. Следовательно, из его данных значение α будет еще более, чем выше приведено, что несогласно с позднейшими наблюдениями. Тем замечательнее, что Мариотт сам выводит такие предельные скорости, которые отвечают значениям k, близким к полученным позднейшим наблюдениям, напр. Рейхом.

[2] Числа, приводимые нами, взяты из третьего издания (London, apud G. et J. Junis MDCCXXVI), подписанного еще самим Ньютоном в предисловии „Jan, 12, 1725—6“.

* В этом примечании есть какая-то опечатка, выяснить которую не удалось. Повидимому, равенства $h = 9.81$ м, $t = 52.8$ м надо заменить через $h = 50.70$ м (что равно 166.5 фут.), но при такой замене h получается равным 0.405 и далее $\alpha = 1.35$; $c = 26.3$. (*Прим. ред.*)

$=253^1/_3$ гран.) и в ней с высоты 112 дюйм. падали восковые шары, в которых был вплавлен свинец для придания им различной плотности. В этом сосуде сделаны опыты 1, 2, и 3-й, произведенные Ньютоном ранее, чем он составил свою теорию, как упоминает о том он сам, а после того опыты делались в сосуде шириною $8^2/_3$ дюйм., глубиною $15^1/_3$ фут. Заметив в опытах 4, 5, 6 и 7, что шары вращаются, уклоняются от вертикали и тогда падают медленнее, Ньютон стал помещать свинец ближе к периферии шаров и заставлял их падать, обратив свинцовую часть шара книзу. Поэтому опыты 8, 9, 10, 11 и 12 надо считать наиболее точными. В некоторых опытах было взято по нескольку одинаковых шаров. Число шаров мы означаем около нумера опыта в скобках, если было взято несколько. Время определя-

Подлинные данные опытов Ньютона

Нумер опыта (и число шаров)	Вес шара в воздухе Q, граны	Вес шара в воде q, граны	Время падения, секунды		Высота падения L, дюймы
			Среднее вероятное	(От и до) сек.	
1 (1)	156 ¼	77	$t=$ 4	—	112
2 (3)	$76^1/_3$	$5^1/_{16}$	15	—	112
3 (3)	121	1	$47^2/_3$	(46—50)	112
4 (4)	139 ¼	7 ⅛	$24^7/_8$	(24—26)	182
5 (4)	154 ⅜	21 ½	$14^5/_8$	(14—16)	182
6 (5)	212 ⅝	79 ½	$8^3/_{20}$	(7 ½—9)	182
7 (4)	243 ⅜	35 ¾	15 ½	(14 ½—16 ½)	181 ½
8 (4)	139	6 ½	25 ½	(25—26)	182
9 (4)	273 ¼	140 ¾	6 ¼	(6—6 ¼)	182
10 (4)	384	119 ½	$9^1/_{24}$	(9—9 ⅓)	181 ¾
11 (3)	48	$3^{29}/_{32}$	22 ½	(21 ¾—23)	182 ½
12 (3)	141	4 ⅜	31 ½	(30 ½—32 ½)	182

лось по секундному или полусекундному маятнику. Под знаком t мы даем секунды, руководствуясь или средним числом из приведенных у Ньютона, или его указанием на числа, заслуживающие наибольшего доверия по обстоятельствам, встретившимся в опыте. Ньютон дает вес в гранах (troy pound). При переводе в метрическую систему мы считаем 1 гран=0.0000648 кг, а 1 дюйм= 0.0254 м.

Так как во всех этих опытах α в формуле (A) велико,[1] то расчет можно производить по формуле (C). Для вычисления

[1] Наибольшая скорость падения была в 1-м опыте, но и тогда $t=4''$, $g=9.81\,\frac{77.0}{156.35}=4.83$, а c близко к 0.72, а потому $\alpha=\frac{gt}{c}=26.8$, вследствие чего e^{α} в громадное число раз превосходит $e^{-\alpha}$.

надо знать плотность воды, но температура не дана, а потому Δ принимаю равным 999, как близкую к обыкновенной. Для определения наибольшего поперечного сечения M служила следующая формула:

$$M = \pi \sqrt[3]{\left(\frac{P-p}{\Delta}\,\frac{3}{\pi 4}\right)^2},$$

где P и p суть веса в пустоте и в воде, выраженные в килограммах. Чтобы из веса Q в гранах в воздухе и из q веса в воде перейти к весу в кг в пустоте P и в воде p, служили приблизительные формулы.[1]

$$\left.\begin{aligned} P &= \left(Q + \frac{Q-q}{830}\right) 0.0000648 \\ p &= q_1\, 0.0000648 \end{aligned}\right| \text{ в килограммах.}$$

Пройденное пространство h в метрах:

$$h = L\ 0.2354.$$

Сообразно этому по данным Q, q, t и L и по формуле (C) имеем, с соответственною делу точностью, в метрической системе:

$$k = 0.13095\,\frac{39.37\,qt^2 - 0.1411\,QL}{L^2(Q-q)^{2/3}},$$

$$\lg = 0.11710 - 1.$$

Опыты Ньютона располагаем затем по порядку величины движущего веса (p или q):

Нумер опыта	Движущий вес, граны	Значение k в 1 по метрич. системе	Средняя скорость, метры	Диаметр, метры
3	1.00	0.03755	0.06	0.025
11	3.91	0.02417	0.21	0.018
12	4.37	0.02493	0.15	0.026
2	5.06	0.02650	0.19	0.021
8	6.50	0.02477	0.18	0.026
4	7.12	0.02614	0.18	0.025
5	21.50	0.02558	0.30	0.025
7	35.85	0.03565	0.30	0.032
1	77.00	0.02605	0.71	0.021
6	79.50	0.03098	0.56	0.025
10	119.50	0.03606	0.50	0.032
9	140.75	0.03186	0.74	0.025

[1] Точнее нельзя взять, потому что не даны ни температура, ни давление, ни влажность воздуха. Мы приняли воздух в 830 раз легче воды. Да впрочем, точные формулы перевода не повлияли бы заметно на точность результата, потому что во временах падения—главная причина некоторой неизбежной погрешности результата k.

Числа двух последних столбцов даны только для того, чтобы видеть степень разнообразия скоростей и диаметров. Величина шаров, как видно из последнего столбца, различалась мало между собою, а потому главные причины, влиявшие на различие величины k, только две: различие скоростей от 6 до 74 см в секунду и погрешность, опытам свойственная по разным причинам (δt, δh, δp) и между прочим зависящая от узкости сосуда. Так, значительные величины k, полученные для 3, 7 и 10 опытов, определяются по всей вероятности тем, что в первом движущий вес (всего 1 гран) определен с погрешностью, ибо очень мал, а в двух других диаметр (0.032) шаров больше, чем у остальных шаров, и ширина сосуда (0.22 м) только в 6.9 раз превосходила диаметр шаров, взятых в этих опытах, а потому, если падение не было центрально, то стенки были близки и представляли особое сопротивление. За исключением этих трех опытов, среднее из 9 остальных:

$$\text{Вода; } \frac{\text{Шар}}{d = 0.03 \text{ м}}\text{; } k = 0.0268 \text{ кг при } v = \frac{\text{от } 0.0 \text{ м}}{\text{до } 0.7 \text{ м}},$$

тогда как общее среднее $k = 0.0292$. Судя по одному тому, что в одном из близких к среднему и вообще одному из лучших опытов, а именно в № 8, наблюдались времена падений „постоянно между 25 и 26 секундами", как пишет сам Ньютон, то даже в лучшем опыте $\delta(t)$ была не менее 0.5″, откуда, так как средняя скорость около 0.3 м, а среднее время падения около 15″, погрешность в скорости не менее $\delta(v) = \frac{0.3 \cdot \delta(t)}{15} = 0.01$, следовательно, возможная погрешность в k не менее $\delta(k) = \frac{2k}{v}\delta(v) = 0.0018$. Наверное она гораздо более этой. Следовательно, из данных Ньютона для падения шаров можно принять $k = 0.027 \pm 0.003$, что подходит и к другим позднейшим данным.

Кроме этих, у Ньютона описываются (под №№ 13 и 14) опыты, сделанные с легкими шарами, падающими в воздухе. Эти опыты сделаны были им в июне 1710 г. и в июле 1719 г. в церкви св. Павла в Лондоне, первые с Hawksee и др., вторые с Desagulier и др. В опытах 1710 г. высота падения $= 220' = 67.05$ м; падали шары стеклянные двух родов: одни небольшие (около 20 мм диаметра) со ртутью, другие гораздо больше (около 130 мм) с воздухом. Шары располагались на средине горизонтальной доски, одно ребро которой снабжено было осью, так что, когда доска отпускалась, шары скатывались и доска падала, а секундный маятник начинал свои качания. Прямые данные опытов:

Шары со ртутью				Шары с воздухом		
Вес, граны	Диаметр, дюймы	Время, секунды		Вес, граны	Диаметр, дюймы	Время, секунды
918	0.8	4		510	5.1	8.5
983	0.8	4—		642	5.2	8.0
866	0.8	4		599	5.1	8.0
747	0.75	4+		515	5.0	8.25
808	0.75	4		483	5.0	8.5
784	0.75	4+		641	5.2	8.0
851	0.775	4	Среднее . .	565	5.1	8.21

Эти данные Ньютон поправляет на время от начала движения маятника до начала падения и эту поправку считает около (circiter) 18 терций или 0″.3, что и отнимает от всех наблюденных времен. Мы делаем то же со средним, выводимым из опытов, хотя считаем, что эта поправка у Ньютона ничем не объяснена, даже знак + или — поправки недостаточно ясен, потому что неизвестно, в какой момент начинались качания маятника: в тот ли, когда доска начала опускаться, или в какой другой.[1]

Поэтому среднее время падения для легких шаров $t = 7''.91$, высота падении $h = 67.05$, вес в воздухе $p = 0.03661$, диаметр $= 0.1295$ м, сечение $M = 0.01317$ кв. м. Данных для плотности воздуха Ньютон не приводит, а потому мы принимаем $\Delta = 1.2$, как отвечающую средней температуре и давлению. Отсюда вес в пустоте $P = 0.03795$, $g = 9.81 \frac{3661}{3695} = 9.46$, $gt = 74.8$, $gh = 638.3$. По этим средним данным и формуле (A) находим, что предельная скорость $c = 9.342$, потому что, полагая $c = 9.3$ м, получаем $gh = 635.7$, а полагая $c = 9.4$ м, $gh = 641.9$ м. Отсюда $k = 0.0265$. Вычисляя же по приближенной формуле (C), получаем $k = 0.0272$. Поэтому:

$$\text{Воздух; } \frac{\text{Шар}}{d = 0.13 \text{ м}} \text{ ; } k = 0.0265 \text{ кг при } v = \frac{\text{от } 0 \text{ м}}{\text{до } 9.3 \text{ м}} .$$

Эта величина почти тождественна с выше найденною для воды, но для ее получения введена Ньютоном поправка 0″.3, которую нет оснований принять с достоверностью (не вводя же ее, получается, однако, k около 0.029), а потому опыты 1719 г., лишенные этого недостатка, внушают большее доверие. При производстве этих последних опытов взяты были шарообразные (особо для того растянутые) свиные пузыри и свинцовые шары в 2 фунта весом. Те и другие падали при этом с высоты 272 фут. Опыт показал, что время падения свинцового шара $= 4.25$ сек.

[1] Судя по описанию, можно думать даже, что маятник начинал качаться после скатывания шаров, а потому поправка должна прибавляться, а не отниматься, как делает Ньютон, тогда k будет гораздо более, что не согласно с опытами 1719 г. Я оставил однако способ поправки, самим Ньютоном введенный, потому что было бы еще более сомнительно вводить поправку, прямо противоположную Ньютоновой.

К наблюдаемой разности времен падения обоих шаров приходилось прибавлять это число и этим путем получены в двух рядах опытов следующие числа, выражающие времена падения 5 пузырей:

В первом опыте: 19.00, 17.00, 18.875, 22.00, 21.125 сек.
Во втором „ 18.75, 18.50, 18.250, 23.25, 21.000 „

Эти наблюдения сделаны лицами, бывшими внизу и наблюдавшими разность времен падения свинцовых шаров и пузырей.

Лица, бывшие наверху, прямо наблюдали времена падения пузырей и получили:

В первом опыте: 19.375, 17.250*, 18.750, 22.125*, 21.625 сек.
Во втором „ 19.000*, 18.625, 18.375*, 24.000, 21.250 „

Совершенная прямизна падения наблюдалась только в опытах, отмеченных звездочкой (*). Пятый пузырь был со складкой. Мы его однако не исключаем (как это делает и сам Ньютон,—рассчитывая данные для него), потому что у него данные близки к тем, которые получены для 4-го пузыря. Ньютон для расчета принимает времена падений:

19.00, 17.00, 18.50, 22.00, 21.125 сек.

Если же взять средние из четырех наблюденных времен, то получается:

19.03, 17.84, 18.56, 22.84, 21.25 сек.

Взявши же для первых четырех пузырей только те данные, при которых находится звездочка (*), имеем среднее:

18.88, 17.13, 18.31, 22.06, 21.25 сек.

Поэтому вышеприведенный Ньютонов выбор времен падения не имеет оснований; более можно доверить последнему выводу, который мы далее применяем к расчету. Веса пузырей были следующие:

128, 156, 137.5, 97.5, 99.125 гран.

Диаметры:

5.28, 5.19, 5.3, 5.26, 5.0 дюйм.

Сличая веса и времена, видно, что все пять пузырей представляют две группы, в одной первые три, в другой два остальных, а так как особой точности в опытах нет, то берем среднее по этим двум группам:

1, 2, 3 Вес 140.5 гран. Время 18″.11. Диаметр 5.26 дюйм.
4, 5 „ 98.3 „ „ 21″.65. „ 5.13 „

Переводя в метрическую систему и пользуясь (опять допуская $\Delta = 1.2$) формулою (A) или (B), имеем:

Нумер опыта	p, кг	Диаметр, м	M, кв. м	h, м	g, м	P, кг	t, сек.	c, м	k, кг
1, 2, 3	0.00910	0.1336	0.0140	82.91	8.42	0.01060	18.11	4.68	0.0249
4, 5	0.00647	0.1303	0.0133	82.91	8.20	0.00786	21.65	3.89	0.0269

Среднее из обоих данных:

$$\text{Воздух; } \frac{\text{Шар}}{d = 0.13 \text{ м}}; \; k = 0.0259 \text{ кг при } v \frac{\text{от 0 м}}{\text{до 4 м}}.$$

Этот вывод так близок к предшествующему и к тому, который вытекает из первых 12 опытов, сделанных в воде, что становится очевидным, как k близко к 0.026 для воды и воздуха при скоростях от 0 до 1 и даже до 9 м. Таким образом, опыты Ньютона установили: 1) пропорциональность сопротивления с v^2, 2) пропорциональность сечению M, 3) пропорциональность плотности среды Δ, т. е. то, что выражает формула (1). Это тем более замечательно, что по теоретическим воззрениям Ньютона (приложение 1) должно было ждать для воздуха и воды разных сопротивлений. Сверх того потому еще, что числа, полученные Мариоттом раньше Ньютона, дают иные численные результаты.

Между позднейшими опытами, произведенными над падением тел в воздухе, особого внимания заслуживают определения Бенценберга и Рейха. Оба они, вслед за рядом других исследователей, занимались в сущности другим вопросом: отклонением падающего тела от вертикальной линии, потому что в свое время думали этим путем найти физическое доказательство вращения земли. Поэтому оба брали тяжелые шары и заставляли их падать с большой высоты. Хотя прямая цель опытов немного прибавила к сущности знаний, но попутно тот и другой из названных исследователей определили и времена, потребные для прохождения определенных пространств. Эти данные имеют особое и важное значение именно по той причине, что плотности падающих тел были велики, а потому достигались большие скорости и падение мало отличалось от свободного падения тел. Тем не менее закон сопротивления выступает здесь с ясностью, а потому мы подробно рассмотрим особенно тщательные опыты Бенценберга, драгоценные потому, что он определял время падения не только от начала падения до конца, как Ньютон и Рейх, а также и на нескольких промежуточных точках, что было ему возможно, потому что опыты производились им внутри сквозной колокольни церкви св. Михаила (Michaelisthurm) в Гамбурге; площадки лестницы допускали полную возможность таких наблюдений. Вся высота колокольни $402^1/_2$ парижских фута, а крайнее расстояние от верхней точки, где начиналось падение, до нижней, внутри колокольни, было 340 парижских фут. Бенценберг подробно описывает употребленные приборы, способы наблюдения и поправки в „Gilbert's Annalen" (1802 и 1803) и в очень интересной своей книге: D-r Benzenbergs Versuche über die Umdrehung der Erde (Dortmund, 1804), в которой, кроме его собственных опытов, изложена история разных сторон вопроса о падении тел. Те числа, которые приводятся далее, взяты из этого сочинения, и я ограничиваюсь

только средними исправленными данными, приведя для примера свод данных для третьего расстояния, равного 144 парижским футам, чтобы показать отчетливость данных Бенценберга. Наблюдения были сделаны в 5 дней. B означает показание барометра (парижские дюймы), T — температуру,[1] a — поправку на уравнение времени, b — поправку на скорость звука (считая скорость = = 1038′ в сек.), c — постоянную поправку на ход часов и на отчет времени. Под чертой дано среднее. Время выражено у Бенценберга секундами, терциями и десятыми терций, но так как 3 секунды везде одни и те же, то в таблице приведены наблюденные терции, а в среднем результате и поправках даны сверх того и десятые терций.

8 мая	11 мая	16 мая	15 мая	20 сент.	20 сент.
B 28.2	28.1	28.1	—	27.7	—
T 20°	14°	9°	—	15°	—
34‴	33‴	24‴	31‴	34‴	31‴
35	36	31	36	23	36
29	32	31	33	37	27
24	34	27	26	27	33
32	36	27	34	29	39
27	35	31	32	34	27
30	29	29	34	23	31
29	33	34	37	30	24
27	33	33	31	37	33
24	32	35	28	30	24
25	28	38	—	29	32
34	—	—	—	—	—
35	—	—	—	—	—
29.7	32.8	30.7	32.3	30.3	30.5
a —3.2	—3.3	—4.0	—4.0	—2.0	—2.0
b —8.3	—8.3	—8.3	—8.3	—8.3	—8.3
c—12.7	—12.7	—12.7	—12.7	—12.7	—12.7
5.5	8.5	5.7	7.2	7.3	7.5

Среднее из этих последних: время = 3 секунды 6.95 терций. Приводим затем общий свод данных Бенценберга и расчет Брандеса (в цитированном сочинении стр. 185 и 196), основанный: 1) на допущении Ньютонова закона сопротивления, по которому наше k в 1 равно $0.0255 = \frac{1}{2g}$; 2) на том, что плотность воздуха

[1] Какой термометр, не знаю; полагать надо, что Реомюров.

принята 800 раз меньшею, чем для воды, 3) на том, что диаметр шаров = 1.46 парижск. дюйм.; 4) что плотность сплава, содержавшего 9 частей свинца и 1 часть олова = 10.9 и 5) что ускорение тяжести в Гамбурге $G = 15.1013$ парижск. фут. Данные в таблице времена выражены секундами и терциями, которые друг от друга отделены для ясности знаком +.

Высота падения в парижских футах	По опытам Бенценберга время падения сек. терции	По теории Ньютона, время падения сек. терции	Время падения в пустоте сек. терции
24.8	1 + 17.08	1 + 17.01	1 + 16.89
27.7	2 + 8.77	2 + 7.55	2 + 7.04
144.0	3 + 6.95	3 + 6.86	3 + 5.28
234.4	4 + 1.05	3 + 59.67	3 + 56.39
240.0	4 + 3.70	4 + 2.59	3 + 59.20
321.0	4 + 48.30	4 + 41.89	4 + 36.63
340.0	5 + 0.00	4 + 50.50	4 + 44.70

Из этого сравнения ясно видно, что замедления вообще малы, но что они гораздо более, чем по ньютоновой теории, и различие опыта с этой теориею так же почти велико, как и различие во временах падения в пустоте и воздухе по Ньютонову представлению. Так, вместо 4″.745, которые требует падение в пустоте для прохождения 340′, и вместо 4.842 сек., которые требует теория Ньютона, опыт дал 5.000 сек. Так как разность даже на предельной высоте мала, то невольно рождается вопрос о том: нет ли в опытах погрешностей, не устраненных и постоянных? Или только в теории Ньютона, особенно приложенной к столь большим скоростям, как здесь, кроется вся причина несогласий? Вместо подробного уяснения, которое легко сделать, сличая данные Бенценберга с другими подобными, где скорости были также значительны, мы приведем сперва слова самого автора об этом предмете, а потом сделаем из его данных выводы, касающиеся закона сопротивления.

Бенценберг, на стр. 186 своего сочинения, говорит, что он привел все опыты, кроме тех, где уже явно были большие отступления, но таких не более одного на восемь, вообще же, продолжает он, „мои опыты не достигли еще той точности, какой можно достичь с часами, дающими терции. Плотность моих шаров не была прямо определена, шары после многократного падения часто значительно уже изменили свою шаровую форму, манометра я не применял, барометр и термометр наблюдал в день один раз, при расчете их показания не приняты во внимание, плотность воздуха принята в 800 раз менее воды, по показанию

барометра, который я наблюдал в церкви, разность плотностей воздуха вверху и внизу башни в расчет не принята, хотя еще Ла-Гир указывал, что в опытах Мариотта это следовало сделать. Когда вновь начнут подобные опыты не для того, чтобы разрушить (теорию), а чтоб возводить — все это надо принять во внимание". Эти слова Бенценберга ясно показывают то совершенно добросовестное отношение, какое имел Бенценберг к своему делу, но, читая их, не должно, из-за слов скромного автора, упускать из вида, что точность, им достигнутая, много превосходит ту, которая была свойственна предшествующим опытам, и даже до сих пор ничего равного его опытам нет по полноте наблюдений, связанной с точностью.[1] В этом убедит, надеюсь, читателей знакомство с дальнейшими опытами, касающимися того же предмета. Если о чем можно ныне особенно сожалеть, так это о том, что в опытах Бенценберга взяты были шары не совершенно одинаковые,[2] не взвешенные и слишком тяжелые, а потому падающие черезчур быстро; но это ему нужно было для его главной цели — определения уклона падающих тел от вертикальной линии.

Для того чтобы подвергнуть данные Бенценберга расчету, мы, во-первых, делаем перевод высот на метрическую систему и терций на секунды, во-вторых, находим разности N между $\frac{g}{2}$ (где g есть действующее ускорение тяжести) и $\frac{h}{t^2}$. Эти последние разности N показывают меру отступления от равномерно-ускоренного движения, потому что для него $\frac{g}{2}=\frac{h}{t^2}$. Этот прием дает возможность прямо видеть степень правильности полученных чисел. Необходимо знать однако g. Напряжение тяжести в пустоте для Гамбурга около $G=9.814$. Плотность сплава, содержащего 90% свинца и 10%[3] около 10.700, а плотность воздуха около 1.21, потому что среднее давление около 28″.1 =

---

[1] Лучших результатов можно, конечно, достичь, но пользуясь регистрирующими хронографами, записывающими малые разности времени. Такие опыты очень желательны, и если позволит время и средства, я их предполагаю произвести.

[2] На стр. 188 даны диаметры 10 употребленных шаров, они суть: 1.7, 1.5, 1.49, 1.61, 1.53, 1.59, 1.6, 1.49, 1.6, 1.48 англ. дюйм. Среднее = 1.56 англ. дюйм. = = 1.46 парижск. дюйм. Сечение наименьшего (1.48) относится к сечению наибольшого (1.7) так, как 1 : 1.32. От одной этой причины в сопротивлении должна быть погрешность около 16%.

[3] У Д. И. Менделеева пропущено слово после „10%". Повидимому, это слово было „примеси", так как плотность этой примеси, которая давала бы сплаву плотность 10.700, была бы 4.6, если считать плотность свинца равной 11.34, и 8.0, если считать плотность свинца равной 11.00 (см. стр. 419). (*Прим. ред.*)

$= 760.2$ мм, а средняя температура около 16°Ц. На основании этого действующее ускорение $g = 9.813$, а потому:

$$N = 4.9065 - \frac{h}{t^2}.$$

Рядом приводим значения $\frac{h}{gt^2}$, служащие для расчета координат кадоиды.

Данные Бенценберга

Высоты, м	Время, сек.	Отступления или величины N	Полоса N
1) $h = 8.051$	$t = 1.285$	$N = 0.0307$	$\frac{h}{gt^2} = 0.4939$
2) 21.992	2.146	0.1311	0.4866
3) 46.776	3.116	0.0899	0.4909
4) 76.142	4.017	0.1878	0.4809
5) 77.962	4.062	0.1815	0.4815
6) 104.273	4.805	0.3903	0.4602
7) 110.445	5.000	0.4887	0.4552

Порядок в найденных из опыта величинах N, как видим, не отвечает порядку по h и t, особенно на 2-й высоте[1] 67.7 фут. или 22 м. Это показывает, что при малом времени и расстоянии, т. е. в двух первых наблюдениях, нет полной уверенности, а потому для получения вывода следует пользоваться только последними пятью данными, где время и пространство больше и влияние погрешностей уменьшено. Особенную цену имеет вышеприведенное 3-е наблюдение; 4-е и 5-е наблюдения близки между собою и, так сказать, одно подтверждает другое. Что же касается до 6-го и 7-го наблюдений, то можно думать, что по крайней мере в одном из них есть неверность. Действительно, оба расстояния разнятся на 6.172 м, а времена на 0.195 сек., т. е. если бы скорость здесь считать равномерною, то она равна 31.6 м, тогда как в промежутке от 5-го до 6-го расстояния она была уже равна 35.6 м и даже между 3-м и 4-м расстояниями средняя скорость достигала 32.6 м. Тем не менее, не имея основания предпочесть одних данных (6 или 7) другим, мы рассчитываем все 5 последних данных, пользуясь координатами кадоиды [см. табл. стр. 452].

[1] Особую неправильность этого опыта видит и Бенценберг. Он говорит на стр. 167 по этому поводу, что вероятное объяснение должно искать в том, что в этом одном наблюдении между отдельными опытами часы ставились на каминный подоконник, другие разы на дерево, а потому на этот раз сильнее других разов часы охлаждались, особенно пружина, а от того ход становился скорее.

Для вычисления, по найденному значению скорости c, значения k служили следующие данные: диаметр шаров = 1.46 парижск. дюйм. = 0.0405 м, а потому сечение $M = 0.001288$, объем = 0.00003474 куб. м, а вес $p = 0.372$ кг, так как плотность = 10.7, величина же $\Delta = 1.21$, как сказано выше. Следовательно, $k = \frac{239.2}{c^2}$. Если бы закон сопротивления и величина k были здесь те же, что и в опытах Ньютона, т. е. $k = 0.027$ в формуле (1), то предельная скорость была бы $= \sqrt{\frac{p}{k\Delta M}} = 94.05$ м, а судя по последним данным, она не более 58. Так как k растет здесь с возрастанием расстояния или скорости, то все явление представляется в следующем виде: при начале падения, когда скорости были такие же малые, как у Ньютона, сопротивление здесь было вероятно также, как у него, около $k = 0.027$. Когда же скорости стали расти от единиц до десятков метров и приближаться к 40—50 м в секунду—сопротивление стало быстро возрастать и притом в такой мере, как не растет оно при переходе от скоростей в 0.2 до 2.0 м. Между 4 и 5 секундами средняя скорость около 35 м и данные Бенценберга дают повод думать, что тогда сопротивление возрастает очень быстро. Но возрастание сопротивления со скоростью начинается и раньше, потому что около $t = 4''$ скорость уже близка к 30 м и k больше, чем у Ньютона, где скорость не выше 10 м. Поэтому можно думать, что разность k в опытах Ньютона и Бенценберга зависит только от разности скоростей. Таков предположительный вывод из данных Бенценберга, но не надо доказывать, что дело не вполне ясно еще ни со стороны точности наблюдений, ни со стороны влияния разрежения, происходящего сзади быстро двигающегося тела, ни со стороны трения и других обстоятельств, могущих изменять направление суждения. Только тогда, когда будет известная сумма таких же наведений, какое представляют опыты Бенценберга, можно будет с уверенностью решить вопрос об изменении сопротивления с переменою скоростей. Одно несомненно: коэффициент k, найденный из данных Ньютона для малых скоростей, негоден для больших, если все сопротивление и тогда выражать $R = k\Delta M v^2$.

Нумер опыта	$\frac{gh}{gt^2}$	α или $\frac{gt}{c}$	c, м	k, кг
3	0.4909	0.335	91.3	0.0287
4	0.4809	0.495	79.6	0.0377
5	0.4815	0.485	82.2	0.0354
6	0.4602	0.740	63.7	0.0589
7	0.4502	0.840	58.4	0.0701

С опытами Бенценберга сходны наблюдения Рейха, хотя он не делал определений на разных высотах, а наблюдал времена только от начала до конца падения. Зато у него были шары

разной плотности. Отчет об его исследованиях изложен в особой брошюре: „Fallversuche über die Umdrehung der Erde, von Reich" (Freiberg, 1832). Обставленные, произведенные и поправленные со всею возможною тщательностью и выраженные метрически определения Рейха дали следующие результаты:

	Исправленное время падения, терции	Число опытов	Высота падения, м	Диаметр шаров, мм	Вес, г	Плотность
1) Большие оловянные шары[1]	357.78 ± 0.72	(42)	158.4265	40.34	270.40	7.878
2) Малые оловянные шары	361.11 ± 0.52	(36)	158.0843	35.59	190.00	8.028
3) Свинцовые шары . .	355.85 ± 0.53	(25)	158.4118	35.41[2]	270.27	10.003
4) Большие костяные шары	407.91 ± 0.89	(6)	158.4500	36.34	46.24	1.790
5) Малые костяные шары	421.10 ± 0.61	(11)	158.4503	28.56	22.52	1.811

[1] Сплав олова с 1% висмута, 2% свинца. Для получения среднего времени Рейх брал все данные, за исключением тех, которые заведомо были плохи; число взятых данных показано далее в скобках.

[2] Для этих шаров у Рейха не дан диаметр, а потому его пришлось рассчитать по весу и плотности.

[3] У Рейха говорится „absolute Gewicht", но едва ли это вес в пустоте; слово „absolute" здесь, повидимому, только противоположение с тотчас следующим выражением „specifisches Gewicht". Мы принимаем его поэтому за p вес в воздухе, а не за P, т. е. не за вес в пустоте.

Рейх принимает для Фрейберга, около которого деланы опыты: ускорение тяжести в пустоте = 9.80986 м. Среднее стояние барометра 317.58 парижск. линий, относительная влажность 93.4%, средняя температура 13°.2 Ц. Все эти числа получены по наблюдениям в той самой шахте (Drei Brüderschachte bei Freiberg, в Саксонии), где делались опыты. Отсюда Рейх вычисляет $\Delta = 1.1550$ кг, что близко к действительности, хотя расчет основан на допущении мало точного веса (1.299) куб. метра воздуха и его коэффициента расширения $\left(\frac{3}{800}\right)$. Принимая данные Ренье, имеем $\Delta = 1.154$, потому что высота барометра = 716.4 мм (считая, что он уже самим Рейхом приведен к 0°, что, однако, неизвестно из мемуара), а упругость водяного пара = 11.06 × × 0.934 = 10.3 мм, высота места над уровнем океана, как дает Рейх, 475 м, следовательно высота в средине пути = 475 — 79 = 397 м,

[1] Полный расчет подобного рода дан в моем сочинении „О барометрическом нивеллировании" (1876) [стр. 54].

а географическая широта места 50°33′, вследствие чего куб. метр воздуха при 760 мм давления и при 0° весит на этой широте и высоте 1.290 кг.

При расчете данных Рейха я избегаю всяких сокращений, какие допускал в предшествующих расчетах, и поступаю следующим образом. Сперва рассчитываю для каждого опыта собственное g, потом gh и gt (t выражено здесь секундами, а не терциями), а затем по значению $\frac{gh}{(gt)^2}$ и по координатам кадоиды находил соответственное α и предельную скорость c $\left(\alpha = \frac{gt}{c}\right)$, которая дает возможность, зная $\frac{p}{\Delta M}$, узнать величину k. Привожу эти подробности, потому что данные Рейха суть лучшие из всех, до сих пор известных.

Действительное ускорение	gh	gt	$\frac{gh}{gt}$ или y	α по кадоиде	Предельная скорость c, м	$\frac{p}{\Delta M}$	Значение k
1) 9.8084	1553.91	58.488	0.45426	0.8004	73.77	183.34	0.03434
2) 9.8084	1550.55	59.026	0.44506	0.8920	66.17	165.50	0.03780
3) 9.8088	1553.83	58.174	0.45915	0.7500	77.57	237.82	0.03953
4) 9.8035	1553.37	66.649	0.34969	1.8026	36.97	38.01	0.02781
5) 9.8035	1553.38	68.805	0.32813	2.0349	38.81	30.19	0.02641

[1] Среднее из всех значений $k = 0.0331$. Судя по реферату (Fortschritte der Physik, 1865, p. 80, подлинник мне известен) о статье I. F. W. Gronau, касающейся расчетов по гиперболическим формулам, он вывел из опытов Ньютона $\delta = 0.51175$, Рейха $\delta = 0.53728$ и Бенценберга $\delta = 0.63191$. Так как у него δ равно 2 gk (по Ньютоновой теории $\delta = \frac{1}{2}$), то по расчету Gronau результат Рейха $k = 0.0325$, что близко к нашему среднему, но расчет Бенценберга, вероятно, как-либо изменен, потому что его числа дают в среднем гораздо большее сопротивление, чем рассчитанное Gronau, по которому $k = 0.0322$. Быть может, однако, что для вывода своего среднего Gronau принял во внимание так называемый вероятный *вес* каждого результата, чего я не делал ни здесь, ни во всем дальнейшем исследовании, потому что не считаю еще опыты над сопротивлением ни достаточно многочисленными, ни довольно совершенными, чтобы приложить к их расчету, так сказать, полную геометрическую точность. То время, которое потратится на такие расчеты, ничем не вознаградится, и будет лучше, если оставить его для личного знакомства с явлениями сопротивления, что я и делаю, насколько мне позволяют другие мои занятия.

Из данных Рейха видно, что такие тяжелые шары, как в №№ 1, 2 и 3, падая с высоты 158 м со среднею скоростью около 26 м и представляющие предельную скорость около 70 м, имеют коэффициент сопротивления около $k = 0.038$, но отнюдь не такой большой (до 0.06 и даже 0.07), как оказалось в опытах Бенценберга. А так как у него даже и высоты были меньше, чем у Рейха, и, следовательно, и скорости меньшие, то вывод из опытов Бенценберга (сопротивление очень сильно и быстро растет

с возрастанием скорости) не находит подтверждения в данных Рейха, опыты которого внушают во всяком случае больше доверия, так как обставлены полнее и ведены лучше, чем определения Бенценберга. Но, однако, в опытах Рейха оказалось, что костяные шары, достигающие предельной скорости около 35 м, при средней скорости падения = 7 м и при высоте 158 м, дали сопротивление меньше, чем металлические шары, из чего следует, что все-таки при меньшей скорости сопротивление в среднем меньше. Притом для этих шаров величина k получилась близкою к той (0.027), которую дают опыты Ньютона в воде и воздухе, а потому надо думать, что при скорости, даже достигающей до 30 м в секунду, сохраняется еще тот же коэффициент сопротивления, какой получается при скоростях меньше метра. И только при скоростях бо́льших, чем 30—40 м, значение k возрастает. Вывод этот, правда, предварительный и требующий проверки, согласуется с данными Ньютона, Бенценберга и Рейха; а так как кроме этих нет других опытов падения в воздухе, то для обыкновенных случаев падения шарообразных тел в воздухе, когда скорости не превосходят, а меньше 30 м в секунду, можно с бо́льшею уверенностью применять постоянный коэффициент сопротивления, близкий к

$$k = 0.027 \text{ или около } \frac{2}{75}.$$

Применяя его, называя через d плотность шара и пользуясь уравнением $p = k\Delta Mc^2$, имеем для воздуха, когда $\Delta = 1.2$:

$$\frac{4}{3}\pi r^3 d = 0.027\,\pi r^2 c^2,$$

а потому можно принять:

$$c^2 = 50\,rd.$$ [1]

Опыты Рейха (1832) я описал тотчас после опытов Ньютона (1719) и Бенценберга (1804) только потому, что между ними видно большое сходство, связь и явное усовершенствование методов. Исторически же следовали раньше опытов Рейха опыты над падением тел в воде, сделанные в 1811—1815 гг. шведскими учеными P. Lagerhjelm, J. H. af Forselles и G. S. Kallstenius.

Подлинный отчет об опытах этих ученых мне, несмотря на все усилия получить его, остался неизвестен. Судя по позднейшей работе Лагерхельма „Tentamen theoriae resistentiae fluidorum constituendae", 1830, в „Nova Acta Regiae Societatis Scientiarum

[1] Напр. дождевые капли радиуса $= \frac{1}{2}$ мм получат в воздухе предельную скорость около 7 м в секунду, дробинки того же радиуса ($d = 11000$) около 22 м. Подобные опыты могли бы быть, кажется, выполнены с легкостью в шахтах или с аэростата. Впрочем, неизвестно, не меняется ли k при малом диаметре.

Upsalensis" (Vol. X, p. 18), сочинение это носит название „Hydrauliska Försök, an ställda vid Falu grufva åren 1811—1815". Första delen Stockholm, 1818. Оно касается опытов, произведенных в Фалуне над сопротивлением моделей, определяемым способом тяги, и над падением тел в воде. Подробный отчет об этих опытах дан в „Kastner's Archiv für die gesammte Naturlehre" (X, 79—112 и XI, 305). Только последний том этого сочинения я нашел в доступных мне библиотеках и он-то и содержит описание опытов над падением тел в воде. Более сжатый реферат о тех же шведских опытах помещен в „Gehler's Physikalisches Wörterbuch" (X, 1842, стр. 1838).

Шведские ученые производили свои опыты в квадратном сосуде 29 фут. (шведских) высотою со сторонами 1.583 фут. Так как сосуд пропускал воду, то приходилось ее приливать. На расстояниях 7.8, 15.8 и 26.4 фут. от центра погруженного тела сделаны в стенках сосуда окна и переднее из них столь малое, что видны были падающие тела только тогда, когда падение было вертикально. Для каждого из падающих шаров определялось положение центра тяжести. Для этого шар покрывался воском, погружался в серную кислоту, на которой плавал, и на верхней точке клалась метка. На это место затем приклеивалось лаком ушко и на нем, при помощи шелковины, погружалось тело в воду, так что центр тяжести и фигуры были на вертикальной оси сосуда, а потому при падении после разреза нити не было вращения и уклона в сторону. Шары были из олова или дерева и в последнем случае пропитаны маслом, покрыты лаком и полированы. Диаметры горизонтальный и вертикальный отличались у первого шарика на 0.0015, у второго на 0.0010 фут, в таблице даны горизонтальные диаметры. Полученные для 10 взятых шариков числа [1] и вытекающий из данных коэффициент k (по метрической системе) приведены в таблице.

Для расчета последнего столбца служили мне следующие соображения. Мы уже видели выше (стр. 421), что наиболее полезные результаты можно извлечь из опытов падения тогда, когда тело достигло почти равномерной скорости. Шары в опытах шведских ученых достигли после 15.8 фут. такой скорости, с точностью доступной в пределах погрешностей наблюдения, потому что даже для наиболее быстро падающего шара (1-го) скорость осталась почти та же в первом и во втором промежутке. Действительно, первые 15.8 фут. пройдены первым шаром со среднею скоростью $\frac{15.8}{4}=3.95$, а последние 10.6 фут. со ско-

[1] Приводим только те случаи, когда шары падали свободно, а тот случай (шар такой же, как в № 6), когда по диаметру было сделано отверстие и шар падал по вертикально натянутой проволоке, не приводим, потому что трение замедлило здесь падение на 2.7 сек. для 26.4 фут. расстояния.

Плотность, считая воду = 1000	Диаметр, шведские футы D	Время от начала падения на расстоянии: 15.8 фут.	Время от начала падения на расстоянии: 26.4 фут.	Скорость в этом промежутке, футы, v	Коэффициент сопротивления k по (c)
1 d = 1634.4	0.29594	4.00 сек.	7.00 сек.	3.53	0.0339
2 1396.0	0.28708	5.357	9.055	2.86	0.0312
3 1174.0	0.28432	9.00	14.00	2.12	0.0247
4 1130.7	0.28432	10.25	5.75	1.93	0.0240
5 1058.1	0.28948	15.25	24.75	1.12	0.0301
6 1065.3	0.28948	14.57	24.14	1.11	0.0345
7 1071.35	0.39844 [1]	12.66	21.66	1.18	0.0459
8 1124.7	0.20326	12.00	19.33	1.45	0.0271
9 1088.9	0.10034	14.20	29.+ [2]	0.90	0.0248
10 1402.1	0.10034	9.125	15.50	1.66	0.0329
				Среднее . . .	0.0329

[1] Едва ли здесь не должно быть 0.29844, т. е. едва ли здесь не опечатка? Если так, то $k = 0.0344$. Впрочем, в отчете об опытах замечено, что в № 7 шар прибыл в весе на 0.0796 лота.

[2] В подлиннике так и напечатано, но значение v, равное 0,90 выяснено Д. И. Менделеевым по времени 29.00. (*Прим. ред.*)

ростью 3.53 фут. Она здесь, и во многих других опытах (напр. в 7-м), вышла в конце падения даже меньшею, чем при начале. Это указывает на неточность опытов и, вероятно, зависит от неточности в определении момента начала падения. Это обстоятельство укрепляет уверенность в том, что должно избегать расчета, основанного на наблюдениях от начала падения, и руководствоваться данными для последнего промежутка, когда скорость стала уже равномерною. В предпоследнем столбце даны скорости v в футах. Так как шведский фут = 0.2966 м, то предельная скорость

$$c = v\,0.2966 \text{ м.}$$

Для расчета по формуле (C) величины k должно знать кроме того p, M и Δ в метрической системе. Так как:

сечение шара: $M = \pi \frac{1}{4} D^2\ (0.2966)^2$ кв. м,

вес в воде: $p = \frac{1}{6} \pi D^3\ (0.2966)\ (d - 1000)$ кг,

плотность воды: $\Delta = 100$,

то по метрической системе коэффициент сопротивления:

$$k = \frac{p}{Mc^2} = 0.002248 \frac{D}{v^2}\ (d - 1000).$$

Так разочтены числа последнего столбца.

Как общее среднее, так и сличение отдельных данных показывают малую точность опытных данных разбираемых определений. Достаточно указать на то, что в 5-м и 6-м опытах, при шаре того же диаметра, у тяжелейшего вышла меньшая предельная скорость, чем у более легкого, хотя начальные скорости вышли такими, какими их должно ждать. Особенно же важно заметить, что опыты № 1 и № 6 указаны как наилучшие авторами, и для них вышло k около 0.034, т. е. гораздо больше, чем во всех предшествующих подобных определениях, дающих k около 0.027. Увеличение коэффициента сопротивления, замечаемое в общем результате шведских опытов, должно приписать тому, что взятый сосуд имел малые поперечные размеры. Большинство шаров имело диаметр около 0.28 фут., а сосуд 1.58 фут., т. е. отношение размеров $= 1 : 5.6$; такое отношение, вероятно, было мало, и близость стенок, вероятно, увеличивала сопротивление. Это видно из того, что для наибольшего шара (7-й) получилось значение k наибольшее. Но и с этой стороны шведские опыты не дают точных чисел, потому что при том же радиусе шаров значения k вышли весьма различными, даже тогда, когда диаметр был мал и скорости не сильно отличались, как в опытах 9-м и 10-м, которые дали для бо́льшей скорости бо́льший k, чего нет в других опытах, напр. в опытах 3-м и 6-м, и даже в наилучших опытах 1-м и 6-м вышло обратное.

Таким образом, шведские опыты несомненно заключают в себе большие погрешности, не меньшие, например, чем в опытах Ньютона для тел, падающих в воде (стр. 443), и если мы привели отчет о шведских опытах, то не ради их точности, а ради того, чтобы показать, что их нельзя приводить для доказательства неверности или справедливости каких-либо предположений или выводов, [1] и еще для того, что в этих опытах в первый раз были взяты, кроме шаров, два тела иных форм. В опыте 11-м взят деревянный цилиндр, высоты 0.2 фут. На передней, т. е. нижней, грани цилиндра был насажен конус с углом $= 27°$, а задняя, т. е. верхняя, грань осталась плоскою. В 12-м опыте был взят точно такой же цилиндр с конусом, только сзади был насажен конус в 52°. Эти два тела имели, значит, один и тот же нос и один корпус, только различались кормою. Здесь наблюдения сделаны на трех расстояниях от начала падения: $h_1 = 7.8$ фут., $h_2 = 15.8$ и $h_3 = 26.4$

11	$d = 1344.96$	$D = 0.17967$	$t_1 = 2.25$	$t_2 = 5.0$	$t_3 = 8.6$
12	1189.9	0.17455	2.6	6.0	9.25

[1] Так, авторы выводят, что сопротивление шара равно половине сопротивления площади большого круга (как Ньютон думал), что трение, вероятно, не зависит от скорости, что сопротивление пропорционально скорости, взятой в степени 2.377 и т. п. Все эти выводы неверны, судя по совокупности всех других опытных исследований.

Для 11-го опыта средняя скорость от 0 до $h_1 = 3.47$, от h_1 до $h_2 = 2.91$, а в последнем промежутке от h_2 до $h_3 = 2.94$ фут. Считая эту последнюю за предельную, можно вычислить k, но доверять ему нельзя, потому что скорости изменяются неверно, как и для 2-го опыта, где они суть: 3.00, 2.36 и 3.26 фут. Одно очевидно, что при одинаковых радиусах сопротивление для шара гораздо больше, чем для цилиндра, у которого передняя часть представляет конус в 26°; влияние же кормы остается здесь неясным, потому что для 12-го опыта все времена больше, чем для 11-го, а потому должно было бы ждать, что скорость 12-го меньше, чем у 11-го, а конечная скорость вышла, наоборот, для 12-го большею, чем для 11-го. Всякий вывод из подобных определений будет сомнителен. Причину ошибок, вероятнее всего, составляет различие впечатлительности трех наблюдателей, участвовавших в опыте. Они были в трех точках и отдельно замечали времена начала падения или прохождения. Личные ошибки отчета времен были, вероятно, очень различны, а потому в результате и не было согласия. Очевидно, что для точности опытов необходимо или одному наблюдателю делать все отчеты (что возможно, когда движение медленно), или, что гораздо надежнее, устроить опыты так, чтобы времена отмечались механически (регистрировались), потому что тогда в результате примут участие только постоянные ошибки приборов, большинство которых может быть точно определено. Притом в той разности времен, которая нужна для расчета, большинство ошибок этого рода уничтожается. Таких-то опытов над падением тел в воде и воздухе до сих пор нет почти вовсе или, правильнее, нет достаточно систематических, направленных к определению сопротивлений.

12 апреля 1880 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1-го выпуска

Стр.

Сопротивление жидкостей, введение 293
Сопротивление есть сила. Связь с воздухоплаванием. 296
Общность законов сопротивления для воды и воздуха. 300

Глава I. **Важнейшие сведения о сопротивлении среды.** Учение Ньютона и „обыкновенная" теория сопротивления, удар и инерция. Реакционное сопротивление. Опыты Венгама. Коэффициент сопротивления K и высоты K_1. Опыты французских академиков. Вывод Понселе. Объяснение сопротивления по закону Торичелли. Опыты Боссю над законом квадрата синусов. Опыты и выводы Борда, Кулона и Дю-Бюа. Трубка Пито и ее применение для определения скорости и давлений. Весовой способ проверки. Способ маятников. Сопротивление воздуха по Дю-Бюа. Две крайности в истории учения о сопротивлении. Определение трения воды Бофуа. Критика его приемов и вывод из его опытов. Исследования Фруда. Критика его приемов и вывод из его данных. Шероховатые доски. Инерционисты и фрикционисты. Оценка теории Бурачка. Индуктивный метод. Отношение сопротивления к высоте воды перед носом судна. Теории и опыты Скотт-Росселя. Опыты с шариками. Приращенная поверхность Ранкина. Фрикционное учение Сен-Венана. Трение воды в трубах и каналах, связь его с боковым сопротивлением. Выводы о трении жидкостей и о влиянии качества поверхности. 303

Глава II. **Измерение сопротивлений.** Необходимость их изучения. Условно принятый способ выражения. Главные способы измерения. Способ падения. Закон падения по Аристотелю и Галилею. Опыты Риччиоли. Изменение напряжения в тяжести в жидкостях. Предельная скорость. Время ее достижения и вывод из нее сопротивления. Вывод закона падения в сопротивляющейся среде. Способ расчета по формуле (A). Кадоида. Сокращенный расчет по (C). Приложение к новым опытам. Пропорциональность первой степени скорости неприложима к действительности. Опыты Мариотта, Ньютона для воды и воздуха, Бенценберга, Рейха, шведских ученых (продолжение во 2-м выпуске).[1] 404

[1] Выпуск 2-й не был напечатан. То же относится к части 2-й мемуара „Об упругости газов" (часть первая—см. Сочинения, т. VI, 1939, стр. 221—589).

Приложение 1. Теория сопротивления Ньютона. Составил Н. Ф. Иорданский.

Приложение 2. Обыкновенная теория сопротивления. Составил Н. Ф. Иорданский.

Приложение 3. Теория Д. Бернулли и Эйлера. Составил Н. Ф. Иорданский.

Приложение 4. Теория Нордмарка. Составил Н. Ф. Иорданский.

Приложение 5. Меррифильд: О сопротивлении воды на корабль. Перевел Н. П. Азбелев.

Приложение 6. Фроуд: Первый отчет об опытах над трением воды. Перевел С. А. Пржибытек.

Приложение 7. Фроуд: Вторая статья о трении. Перевел Н. П. Азбелев.

Приложение 8. Фроуд: Лекция о сопротивлении. Перевел Н. П. Азбелев.

[Приложения 1—8, как лишь проредактированные Д. И. Менделеевым, не помещаются здесь. Точно также не помещен лист 12 чертежей, относящихся к аэростату Дюпюи-де-Лома (подробности в 5 главе) и скопированных с подлинника Севастьяновым. (*Прим. ред.*)

Журнал Русского Физико-Химического Общества, 1880 г., т. XII, ч. физ., вып. 4 отд. I, стр. 117.

ВЫПИСКА

из протокола 19-го заседания Физического Отделения

4 марта 1880 г.

10) Д. И. Менделеев сообщил о том, что сложные расчеты меры сопротивления k, считая (хотя бы условно) сопротивление R пропорциональным квадрату скорости v, т. е. полагая $R = k\Delta M v^2$, где M есть поперечное сечение, могут быть производимы очень легко при помощи вычисленных заранее значений кривой, которую можно назвать *кадоидою* и которой уравнение есть:

$$y = \frac{1}{x} 2 \lg n \frac{e^x + e^{-x}}{2},$$

где $x = \frac{gt}{c}$, а c есть предельная скорость падения в среде, определяемая из того условия, что при достижении этой скорости сопротивление равно весу тела p в среде, т. е.

$$p = k M c^2.$$

Кадоида при $x = 0$ имеет ординату $= 0.5$, что и отвечает падению в пустоте. При $x = \infty$ ордината $y = 0$, т. е. ось x-ов есть ее абсцисса. Составив таблицы значений y, отвечающих x, легко рассчитывать k по данным h (высота падения), t (время от начала падения) и g (ускорение тяжести жидкости), потому что

$$y = \frac{gh}{gt^2}.$$

Журнал Русского Физико-Химического Общества, 1882 г., т. XIV, ч. физ., вып. 5 стр. 209.

ВЫПИСКА

из протокола 36-го заседания физического Отделения

16 марта 1882 г.

7. Д. И. Менделеев сообщает от имени своего и г. Кузьминского о результатах опытов, предпринятых ими для прямого определения трения воды о равномерно движущуюся цилиндрическую поверхность (диаметром в 20 см), могущую сокращаться и приводимую в круговращение при помощи двух падающих грузов, шнуры которых, проходя чрез блоки, сматывают я со шкива, прикрепляемого из оси цилиндрической поверхности, погруженной в воду. Изменяя диаметр шкива (но сохраняя его вес), можно достичь разных скоростей вращения при той же движущейся поверхности в одинаковых грузах. Измеряя работу груза при сдвинутой и раздвинутой цилиндрической поверхности, чрез разность определяется работа трения той цилиндрической поверхности, на которую сокращается прибор при сдвигании, как это и предлагал Д. И. Менделеев в своей книге „О сопротивлении жидкостей" выпуск 1-й (1880), стр. 101 (в выноске).[1] Несколько сот определений, сделанных с прибором, заказанным на средства морского министерства, произведены при скоростях от 0.5 до 1 м в секунду в химической лаборатории университета. Главную цель опытов составляло решение вопроса о том, какой степени скорости пропорционально трение в условиях опыта. Оказалось, что трение и здесь близко к пропорциональности квадрату скорости, как это найдено для движения воды в широких трубках и для поступательного движения в опытах Бафуа (1795—1798) и Фроуда (1870—1874), произведенных в больших размерах с досками длиною до 50 фут., движущимися в воде. Коэффициент пропорциональности в среднем оказался также близким к найденному двумя упомянутыми исследователями, а именно близок к 0.137, так что трение воды f, при обыкновен-

[1] Сочинения, т. VII, стр. 263. (*Прим. ред.*)

ной температуре на движущуюся поверхность можно выразить с приближением, достаточным для практики, равенством:

$$f = Sv^2 0.14 \text{ кг},$$

где S есть мера поверхности, совпадающей с направлением движения, и выражена в кв. метрах, а v — скорость в секунду в метрах. Особые опыты показали, что, окружая движущийся цилиндр неподвижным, имеющим двойной диаметр (0.4 м), не замечается изменения в мере трения.

Журнал Русского Физико-Химического Общества, 1887 г., т. XIX, ч. физ. вып. VII, стр. 336.

ВЫПИСКА

из протокола 85-го (135) заседания Физического Отделения

29 сентября 1887 г.

IV. Д. И. Менделеев делает сообщение о полете, совершенном им, по предложению Технического общества, на военном водородном аэростате из города Клина во время солнечного затмения 7 (19) августа. Миновав туман, Д. И. увидел темный диск луны, окруженный короной в виде светлого, серебристого кольца, ширина которого была в разных местах неодинакова, но нигде не достигала величины радиуса диска. Темнота была не более сумеречной, что объясняется отражением от облаков рассеянного света, проникавшего в сравнительно узкую полосу полного затмения. Удалось Д. И. наблюдать также бегущую с правой стороны тень, ход которой казался прерывистым, как бы скачущим. Д. И. воспользовался кроме того случаем произвести термометрические измерения на высоте около 3 км (наибольшая высота поднятия аэростата была около $3^1/_2$ км). В 6 ч. 55 м. шар находился на высоте $2^1/_2$ км, причем температура оказалась — 1.°2, хотя ощущения холода не было; затем на высоте $2^3/_4$ км, температура была 0°; еще выше 3°; после чего по мере дальнейшего поднятия температуры последовательно наблюдались[1] 5° (в $7^1/_2$ ч.), 2° и, наконец, 1°. Внизу же перед поднятием было 13°, а после спуска 16°. Итак, следовательно, получился первый минимум — 1.°2; затем максимум 5°, потом опять минимум + 1°. Объяснить это странное на первый взгляд явление можно влиянием облаков. Максимум именно наблюдался под облаком; минимум же при безоблачном небе; на первый минимум оказывало, вероятно, влияние и затмение. Эти, хотя и отрывочные, наблюдения подтверждают такую линейную зависимость температуры от давления, по которой предельная температура воздушного слоя, соответствующая давлению, равному 0, близка к — 40°.

[1] В подлиннике „наблюдалось". (*Прим. ред.*)

В заключение Д. И. вновь указывает на важность метеорологических наблюдений на аэростатах в высших слоях атмосферы, в особенности в России, где продолжительные ясные дни весьма не редки и где, вследствие ее континентального положения, такие исследования не представляют опасности.

[V. Н. Н. Хамоктов показывает в проекции на экране при помощи фонаря с друммондовым светом увеличенные изображения фотографических снимков с солнечной короны, снятых различными лицами в различных местах; почти все эти изображения имеют общее сходство между собою].

VI. Д. И. Менделеев замечает, что и ему прямо на-глаз корона представилась в том же виде, как на красноярских фотографиях, т. е. в виде довольно широкого светлого кольца, без длинных звездообразно расположенных лучей, как это обыкновенно рисуют.

1887. Описано тут все и так ясно, что прибавлять нечего. Это одно из примечательных приключений моей жизни. См. № 254.

159. Воздушный полет из Клина во время затмения, „Северный Вестник“, 1887.

(Северный Вестник 1887, №№ 11 и 12

ВОЗДУШНЫЙ ПОЛЕТ ИЗ КЛИНА ВО ВРЕМЯ ЗАТМЕНИЯ

Условия полного солнечного затмения 7 августа 1887 г. привлекли общее внимание ученых еще года за три до срока. Многие причины этому содействовали. Важнее всего было то, что очень редко полное затмение приходится видеть на длинном пути по суше, населенной мирными жителями, а это затмение должно было быть видимо на всем пути от восточных частей Германии через всю центральную Россию и через Сибирь до Тихого океана. Можно было избирать для наблюдения любое место на этом пути во много тысяч верст, не опасаясь за спокойствие и жизнь наблюдателей. Полное затмение не составляет очень редкого явления, но тень луны часто проходит через океаны или через такие страны, куда добираться трудно или где оставаться и наблюдать не безопасно. Поэтому все страны, где науки развиваются, отправили наблюдателей с необходимыми приборами преимущественно в центральную Россию, а отчасти в Сибирь, где затмение было видно в более поздние часы дня. Англия, Франция, Италия, Американские Штаты, Германия и Россия сделали необходимые приготовления. Так, например, около Клина, в соседних имениях, где полное затмение должно было произойти в 7-м часу утра и длиться около двух минут, расположились наблюдатели от Русского Физико-Химического Общества из Англии, Италии и Германии. Астрономы и физики привезли с собой многие специальные приборы, иные—нарочно для наблюдения затмения приготовленные, устроили временные обсерватории и определили астрономические постоянные избранных мест, т. е. местное время, широту, долготу; сделали пробы снятия фотографий и т. п., словом, труда предприняли не мало. Им помогали многие и доставляли им всевозможное. Так, я сам был свидетелем того, с какою доброжелательностью граф Олсуфьев, в своем имении Никольском-Обольянове, отстоящем верст на 25 от станции Подсолнечной, поместил и помогал членам Русского Физико-Химического Общества, прибывшим для наблюдения полного солнечного затмения.

Но что же заставляло так хлопотать из-за двухминутного явления? Конечно не тьма, которую все и всюду, давно и долго

наблюдать могут без всяких хлопот, хотя она и появляется при полном затмении не в урочное время и хотя она кое-что в правильном ходе жизни на земле нарушать должна. Этими изменениями, всей этой тьмою, интересовалась более публика, а не те, которые приготовились изучать затмение. Их привлекал более всего свет. Они приготовились вновь точнее и с разных сторон изучить тот светлый ореол, который окружает солнце и называется *„короною"*; потому что свет этот столь слаб, что его обыкновенно не видно кругом солнца, а виден он только при полных солнечных затмениях. Солнце само за последние лет двадцать изучено очень полно при помощи анализа света, им испускаемого. Но что подле него, что в короне, что такое корона и как относится она к солнцу и остальному солнечному миру, еще совершенно не ясно и ныне пришла пора не смотреть, а уже наблюдать и точно измерять ближайшие к солнцу части солнечной системы. Как это связано со всей историею естествознания, как важно решить вопрос о короне, что в этом отношении сделано и предполагается, — здесь было бы неуместно развивать, потому что для этого необходимо рассказать очень многое, начиная от учений и наблюдений о метеорных камнях и центробежных силах, до понятий и данных о вихрях и солнечных пятнах. Это изложено уже отчасти другими и, вероятно, скоро и подробно будет развито в нашей научной и популярной литературе. Но мне необходимо хоть намекнуть на то, что в короне солнца кроется решение одной стороны крупного вопроса о происхождении миров. Мы сами, и все нас окружающее на коре земли и сама земля, как и вся система планет, произошли и живут от солнца. Так учат не одни китайцы, а от Канта и Лапласа до современных ботаников и механиков — все вникавшие в действительную жизнь вселенной. Довольно сказать, что земля должна быть признана отрывком из солнечной атмосферы, что без тепла и света солнца на земле были бы только холод и смерть. Но вместе с этим светлым и привычным учением является за последнее время учение или понятие, на вид прямо противоположное. Земля и солнце суть только скопления мелких космических единиц, подобных метеорной пыли или кометам, которые несомненно, состоят из скопища такой космической пыли. Тогда солнце со всей его силой само оказывается зависящим от невидимо малых тел, носящихся в пространстве, и вся сила солнечной системы черпается из этого бесконечного источника и зависит только от организации, от сложения этих мельчайших единиц в сложную индивидуальную систему. Тогда „корона", быть может, есть сгущенная масса этих мелких космических тел, солнце образующих и его силу поддерживающих. Как ни противоположны на первый взгляд кажутся оба понятия, они так или иначе уложатся, помирятся — таково свойство науки, которая

содержит выводы мысли, испытанные и проверенные. Надо только не довольствоваться одним уже установленным и узнанным, надо не окаменеть в нем, все дальше и глубже, точнее и подробнее изучать все явления, могущие содействовать разъяснению этих коренных вопросов. „Корона" этому изучению, конечно, во многом поможет.

И я не чужд был тех интересов, которые связаны с наблюдениями полного солнечного затмения, когда уезжал на вакацию к себе в Боблово, находящееся в Клинском уезде, в полосе полного солнечного затмения. Еще ни разу мне не пришлось видеть этого явления, а теперь можно было в привычных условиях не только видеть, но и наблюсти эту редкость. Ко мне хотели приехать приятели для той же цели. И вот, когда уже оставалось всего дней восемь до затмения, в ночь с 29 на 30 июля, пришла ко мне телеграмма от товарища председателя императорского русского Технического Общества, М. Н. Герсеванова, с предложением сделать наблюдение полного солнечного затмения с аэростата, поднятие которого общество снаряжает из Твери, где полное затмение должно быть видимо в продолжение, примерно, одной минуты. В телеграмме, между прочим, сказано, что „Техническое Общество снаряжает поднятие шара из Твери во время солнечного затмения", и „Совет Общества считает долгом заявить об этом", чтобы я „в случае желания лично мог воспользоваться поднятием шара для научных наблюдений".

Чтобы это предложение и дальнейшее изложение всего происшедшего сделались ясными, необходимо, хоть в немногих словах, сказать о том, какими причинами я должен был объяснить себе задуманное поднятие на аэростате во время затмения, и обращение ко мне с предложением сделать наблюдения при поднятии.

Чересчур часто было и будет, что все приготовления, сделанные для наблюдения полного солнечного затмения, окажутся потерянными, потому что в момент затмения облака скроют солнце, а потому С. К. Джевецкому пришла мысль воспользоваться аэростатами для того, чтобы не пропустить редкий в природе случай, а поднявшись выше облаков, наперекор условиям погоды, иметь уверенную и полную возможность наблюдать солнечное затмение. Притом, в верхних частях атмосферы воздух прозрачнее, и все явления на небе рисуются там отчетливее и чище. Эта совершенно новая мысль была высказана С. К. Джевецким летом этого года в среде русского Технического Общества, в котором, кроме всяких других отделов техники, уже давно существует отдел воздухоплавания. Этот отдел Общества имеет свой аэростат, предпринимает полеты и вообще разрабатывает вопросы по аэростатической специальности. Поэтому немудрено, что Совет Общества пожелал осуществить оригинальную мысль своего сочлена и захотел техникою вновь победить природу, а потому

и организовал поднятие шара из Твери, где существует газовый завод и где проходит полоса полного солнечного затмения.

Совет Общества обратился ко мне, как к одному из членов общества, конечно, по двум причинам: во-первых, потому что я живу летом недалеко от Твери, а во-вторых, потому что вопросами аэростатики я занимался в моей предшествующей деятельности, участвовал, хотя и мало деятельно, в работах аэростатического отдела и очень уважаю почтенную самостоятельную и настойчивую деятельность С. К. Джевецкого в этом отделе. Мои занятия аэростатикой определились тем обстоятельством, что, занимаясь в начале 70-х годов исследованием упругости разреженных газов, я невольно пришел к вопросу о верхних слоях атмосферы, где плотность и упругость воздуха малы, и к разбору аэростатических поднятий в верхние слои атмосферы. Изучение данных, собранных Глешером и другими наблюдателями, привело меня к предположению определенной зависимости и уменьшения давления и температуры с поднятием в верхние слои атмосферы. В атмосфере, не возмущенной и лишенной облаков, мне кажется возможным признать прямую пропорциональность уменьшения температуры с уменьшением давления. Свои выводы я основал преимущественно на числах маститого исследователя этого предмета, англичанина Глешера, с которым еще недавно лично имел случай видеться. Он сделал массу наблюдений в таких высоких областях атмосферы, до которых никому другому, ни раньше, ни после него, не удалось еще достигать. Он был на высоте, несомненно большей девяти верст, тогда как французские исследователи, Кроче Спинелли и Сивель, достигнув меньшей высоты, потеряли жизнь и только третий их спутник — Гастон Тиссандье — возвратился на землю невредим, хотя и он на высоте большей семи верст впал в беспамятство и бессознательность. Мне казалось, после изучения до сих пор сделанного, что многое еще необходимо доделывать, — чтобы уяснить равновесное и возмущенное состояния атмосферы, и что должно совершенно ясно и резко отличать нормальное и совершенно безоблачное состояние атмосферы от нарушенного равновесия и особенно от того случая, когда разные области атмосферы разделены, как экранами, слоями висящих или движущихся облаков. Нормальное или равновесное состояние, конечно, надобно было бы изучать ранее, чем возмущенное какими бы то ни было явлениями, для того чтобы была исходная точка в суждении о совершающихся в природе изменениях, определяющих те перемены погоды, которые имеют столь важное практическое значение для жизни всей природы. Грозы, бури, ветры, дожди изучают однако уже давно и подробно, а норму, состояние покоя, ясную погоду почти не знают. Так во всем сперва бывает — от истории стихий и земли до организма человека,

у которого изучили болезни раньше, чем стали интересоваться нормальными отправлениями. Не зная нормы, блуждают в понимании отступлений, тем более, что их много, а прочное равновесие одно, в погоде ли, или в организме, в строе государства или в системе солнца. Нестойкие равновесия отступлений, конечно, могут многое уяснить, но лишь тогда, когда прочное, устойчивое равновесие станет ясным. Прочная, ясная погода не редкость внутри больших континентов, таких, как наша страна, и редкость большая в Англии, где сделаны по сих пор лучшие наблюдения в верхних слоях атмосферы. Поэтому я считал и до сих пор считаю Россию с ее громадным материком и континентальным климатом наиболее приличным местом для наблюдения с аэростатов нормального состояния верхних слоев атмосферы. И вот я задумал ряд аэростатических восхождений внутри России во время длящихся ясных дней, какие у нас не редки во все времена года и какие составляют громадную редкость в той Англии, где Глешер производил наблюдения. Составил и проект аэростата, допускающего возможность безопасно оставаться на больших высотах в атмосфере и, быть может, подняться даже выше той громадной высоты, до которой достиг Глешер в своем знаменитом поднятии 5 сентября 1862 г. Меня так заняла гордая мысль подняться выше знаменитого англичанина и постичь закон наслоения воздуха при нормальном состоянии атмосферы, что временно я оставил все другие занятия и стал изучать аэростатику. Чтобы найти хоть первые средства, необходимые для осуществления моего предположения, издал ряд книг, выручку от которых хотел посвятить на устройство приборов. Хотя множество других дел отрывало меня от этих занятий, но мысль развивалась вместе с изучением предмета. В это время морское и военное министерства послали меня заграницу для изучения современного положения аэростатики. Этим случаем я воспользовался для пополнения своих сведений в этом отношении и для изучения всяких практических подробностей, к аэростатике относящихся. Вот это-то подробное изучение практики дела дало мне возможность составить полную смету расходов, необходимых для выполнения моих намерений, и когда я подвел сумму, то оказалась цифра, превышающая мои первоначальные расчеты и те суммы, которые у нас можно доставать для научных целей. В это время уже оказалось сверх того, что продажа книг, которою я хотел покрыть начальные расходы, не только не дала прибыли, а оставила одни расходы, так что мне не с чем было начинать дело. Масса других занятий, легче исполнимых, затушевала, хоть и не стерла мысль о великой пользе, которую могли бы принести систематически организованные наблюдения при высоких поднятиях в ясную погоду в России. Ясные дни для русской науки однако еще не пришли. Они наступят.

В результате осталось довольно близкое знакомство с аэронавтикой. До сих пор только часть этих мыслей и то отрывками высказана мною в моем сочинении „О сопротивлении воздуха" (выпуск 1-й, 1880 г.) — больше издать мне было невозможно, и я пользуюсь случаем здесь сообщить тот вывод своего знакомства с предметом, который может быть поможет: одним — избежать напрасных увлечений и разочарований, а других направить к полезным усилиям.

Уверен, прежде всего, в том, что аэростатика встала на верный путь, но еще очень далеко до возможного в ней совершенства. Так, на аэростатах можно подниматься выше, чем поднимались до сих пор. Там дышать свободным воздухом уже нельзя, потому что упругость того кислорода, который необходим для всей деятельности людской, на тех высотах достигает наименьшего предела, при котором в кровь уже не поступает достаточное количество этого газа. Но легко устроить соответствующие цели приборы, например подъемные шары, с аэростата спускаемые и заключающие самопишущие приспособления, или же замкнутые со всех сторон помещения, в которых наблюдатель будет и на тех высотах оставаться в безопасности и управлять подъемом и спуском шара, и между тем изучать условия верхних слоев атмосферы, где надобно искать зародыш всех погодных изменений, в атмосфере совершающихся. Если можно осуществлять подводное плавание или подводные работы в водолазных колоколах, то очевидно, что возможно устроить и безопасность пребывания в разреженном воздушном слое. Техника аэростатики дает нам полную возможность, нужны лишь обращенные на это немалые средства. Британская ассоциация для успеха наук или английский съезд естествоиспытателей доставил Уельшу и Глешеру необходимые средства для зондирования атмосферы, а эти средства черпались там из частных сборов. Во Франции Жиффар и другие лица также много жертвовали для той же цели, но успех уже был меньше, потому что не было достаточной организации и надлежащих средств. Необходимы же десятки тысяч, потому что аэростаты надо большие, наполнять их необходимо водородом, который дорог, и восхождений надо много, чтоб результат был прочный и лишенный случайностей. Когда-нибудь придет, уверен, такое время, что на подобные предприятия не станут жалеть средств, потому что общие средства прибудут, когда люди узнают место образования погоды. Не в технике аэростатики причины того, что до сих пор верхние слои атмосферы не измерялись приборами и не ответили на вопросы тех, кто вникал в задачи равновесия и возмущения воздуха.

Далее, изучая аэронавтику в ее подробностях, я убедился в том, что продолжительность аэростатических полетов можно увеличить во много раз противу достижимой ныне, что добычу

легчайшего газа—водорода можно улучшить и удешевить, что, увеличивая размеры аэростатов и изучая воздушные течения, можно пользоваться аэростатами для направления полетов в желаемую сторону и что нет никакого технического препятствия, кроме стоимости, для устройства таких сильных управляемых аэростатов, которые будут в силах идти противу обычных ветров, хотя, конечно, аэростаты, как и птицы и как приборы, им подобные, не будут никогда преодолевать ветры значительной скорости, что, впрочем, на практике пока вовсе и не требуется. Так первые плаватели по морям ждали попутных ветров, в бурю не выходили, скрывались у берегов, да и ныне выжидают. Если аэростат или летающие машины успеют бороться сегодня со слабым ветром, завтра они победят и более сильные и, если будут иметь силу оставаться в воздухе долго и подниматься высоко — они горы перелетят, от бурь уйдут и их переждут в воздушном океане, где столкновение, составляющее главнейшую причину гибели кораблей, весьма мало вероятно, потому что можно изменить уровень, в котором движение совершается, что вода не позволяет.

Но внимательное изучение предмета заставляет меня думать, что при возможном усовершенствовании не только аэростатов, но и всяких других каких-либо, хотя бы и птицеподобных летательных приборов, при помощи каких бы то ни было — газовых или паровых, двигателей, с могуществом динамита или элекричества, — все же аэростаты и аэродинамы не будут служить для обыденной нужды человека, т. е. не станут практическими средствами для передвижения людей или их произведений, грузные товары составляющих. Это движение достигается, как победа знания над природою, как новое орудие силы людской, но не для тех внешних переворотов, не для тех уничтожений границ и таможен, словом не для осуществления тех часто высказываемых утопических мнений об аэростатике [какие] еще нередко встречаются в литературе. Словом, я думаю, что аэростатические и всякие другие полеты по воздуху будут осуществляться и развиваться, но не для обычных людских отношений. Они всегда останутся для исключительных применений, потому в особенности, что этот род передвижения неизбежно будет всегда дорогим, а дешевизна составляет всегда первое условие для обычных способов перемещения. Вот там, где цена задержки не составляет, там место применения воздушных путей. Бывают условия, когда хотят знать или когда ищут здоровья или наслаждения — тогда не торгуются. При этих условиях и надобно искать места для воздушных полетов. Кроме законов атмосферы и бурь, можно многое получить и узнать со стороны воздуха. В свободном воздухе можно черпать наслаждение и силу, и если аэростаты или другие летательные приборы достигнут желаемого совершенства, они будут носиться

в воздухе для удовлетворения этим целям, когда не будут спрашивать о стоимости. Во время войны с людьми, как равно и при борьбе с природой, т. е. для научного дела, для передачи известий и для тому подобных исключительных целей, также иногда не приходится узнавать цену. Требуется лишь достижение желаемого, и тут роль воздухоплавания может быть не только полезною, но и весьма важною. Аэростаты в их современном первоначальном виде эти цели уже выполняли. Так, французам они служили во время войн, англичанам — для изучения атмосферы. Вот и для наблюдения затмений аэростаты служить станут. Знать многое и здесь столь важно, что не время спрашивать о ценности. Техническое Общество, предложив мне произвести наблюдения с аэростата во время полного солнечного затмения, хотело, конечно, служить знанию и видело, что это отвечает тем понятиям о роли аэростатов, какие ранее мною развивались.

Взвесив возможности и случайности в том предложении, которое было получено мною, я считал необходимым принять лестное предложение, но только при некоторых условиях. Их смысл станет понятным, если я передам свою ответную телеграмму и ряд мыслей, возникших в моей голове при обсуждении предложения. Моя ответная телеграмма была следующая: „Тверской газ может дать неудачу просите военного министра отпустить в Клин команду лучшего водородного шара не медля испытаем тогда поеду глубоко благодарен". Знаков препинания в телеграмме не ставится, но мне казалось без них ясным, что испытание будет сделано с военными аэростатами относительно их быстрого приготовления к делу.

Обыкновенные облака, не только грозовые, т. е. тучи, но и других видов, невысоко плывут в воздухе, редко выше двух верст; но даже на высоте 7 и 10 верст существуют облака. Глешер и другие наблюдатели часто видали их над своей головою при самых высоких поднятиях, а легкие перистые облака несомненно плывут на высоте, людьми еще не достигнутой, до 13 или даже 15 верст. Следовательно, при поднятии на аэростате, убавляется, но не устраняется случайность облаков, закрывающих затменное солнце с его короною. Убавить случайность невыгодных обстоятельств, значит увеличить вероятность выгодных условий. Оттого наблюдения с аэростата полного солнечного затмения полезны. Но убыль случайностей и вероятность успеха тем больше, чем выше будет подъем, а потому необходимо было требовать, чтобы подъемная сила аэростата или, иначе сказать, количество балласта, которое можно взять при подъеме, должны быть значительными, чтобы выйти из случайных облаков в момент затмения. Без большой подъемной силы или без значительного балласта нельзя подняться на аэростате высоко, потому что по мере поднятия аэростата давление как

в воздухе, так и в газе, шар наполняющем, уменьшается, а потому легкий газ аэростата расширяется, сперва расправляет складки аэростата, а потом выходит из его нижнего отверстия. По мере того, как аэростат поднимается, он приходит в равновесие с окружающим воздухом, т. е. останавливается на известной высоте. На этой высоте вес аэростата со всеми его частями сложенный с весом газа, аэростат наполняющего, равняется весу воздуха, аэростатом вытесненного. Так, например, если оболочка шара, корзина и вес груза аэростата равняется 30 пуд. и если на той высоте, на которой шар остановился, вес воздуха вытесненного шаром, равен 60 пуд., то очевидно, что вес газа, находящегося в шаре, будет равен 30 пуд., или это значит, что плотность газа, наполняющего аэростат, вдвое менее плотности воздуха при том же давлении и температуре. Чтобы подняться выше, надо выбросить часть груза. Допустим, что мы выбросили несколько пудов балласта. Шар, очевидно, поднимется вверх, т. е. всплывет, но опять остановится на некоторой высоте, когда сумма веса шара и того газа, который в шаре вмещается, будет равна весу воздуха, шаром вытесненного. Но и этот вес с поднятием уменьшается, потому что сдавливается меньшим столбом вышележащего воздуха. Высоту поднятия можно расчесть, зная плотность газа по отношению к воздуху, объем и вес аэростата с людьми и балластом, в нем находящимися, и вес равного объема воздуха на различных высотах.[1] Очевидно, что для высо-

[1] Для того чтобы дать в этом отношении хотя некоторые числа, привожу таблицу, составленную на основании данных Глешера, о температуре и влажности воздушных слоев для ясной погоды. Все числа даны по метрической системе. 1000 мм = 39.37 дюйм., 1000 кг = 61.04 пуд., 1000 куб. м = 35 316.5 куб. фут. Исходная температура на земле принята = 15° Ц.; влажность 60%, давление 760 мм. Давления взяты по показаниям анероида, считая его выверенным при уровне моря и при широте 45°.

Анероид. Давление в мм	Термометр. Температура по Цельсию	Гигрометр. Влажность, в процентах	Высота, в м	Вес 1000 куб. м воздуха, в кг
760	15°	60	0	1222
700	11.0	64	690	1141
650	7.6	64	1300	1073
600	4.3	63	1960	1003
550	+ 1.0	62	2660	931
500	— 2.4	58	3420	857
450	— 5.8	52	4250	781
400	— 9.1	44	5170	703
350	—12.5	36	6190	624
300	—15.9	27	7360	542
250	—19.2	18	8720	457

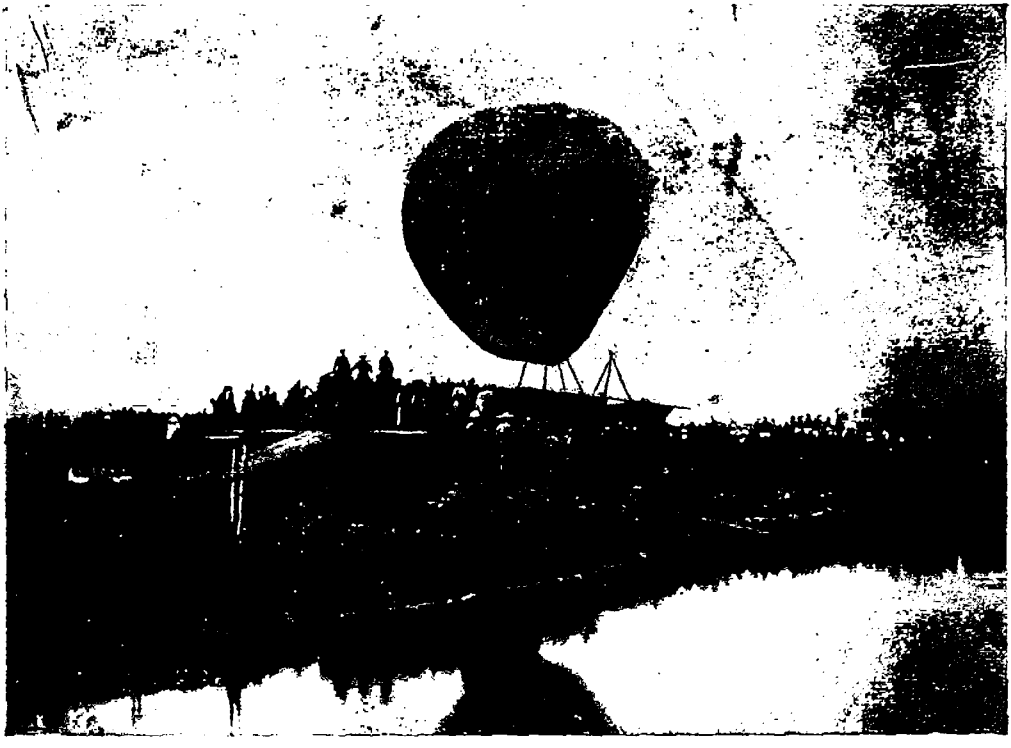
Хотя числа этой таблицы разочтены с возможною тщательностью из средних данных, но имеют лишь значение для общего первоначального суждения.

кого поднятия необходимо, чтобы соединялись следующие условия: шар должен быть по возможности велик, газ, его наполняющий, — по возможности легок, материя, из которой делается шар, и все его снасти также должны быть по возможности легкими.

Объем шара в данном случае нельзя было увеличивать, потому что шар надо было брать тот, какой есть. Вес шара также нельзя было изменять и для его уменьшения есть, очевидно, практический предел, не только в прочности материи, из которой делается оболочка шара, но и в прочности веревок и других частей шара, равно как и в весе необходимых приборов и принадлежностей, кроме самих наблюдателей. А потому в данном случае можно было высоту поднятия увеличивать только при помощи уменьшения плотности газа, аэростат наполняющего. Обычный, светильный газ, употребляемый для освещения, имеет плотность, примерно, вдвое меньшую, чем воздух. Можно легко приготовить на газовых заводах такой газ, которого плотность будет в $2^1/_2$ раза меньше плотности воздуха. Но приготовление еще более легкого газа невозможно на обычных газовых заводах без особых ценных видоизменений, тогда как водород сам по себе в чистом виде в $14^1/_2$ раз легче воздуха. В том не вполне чистом состоянии, в котором приходится водородом наполнять аэростаты, обыкновенно принимают его плотность равною $^1/_{10}$ противу плотности воздуха. Следовательно, все же водород по крайней мере в 4 раза легче, чем тот газ, который приготовляется для освещения на газовых заводах. При обычных условиях устройства аэростатов можно считать примерно на каждую тысячу куб. метров емкости шара около трех пудов балласта на версту подъема, не считая начального подъема, при котором шар может расправлять свои складки и увеличиваться в своем первоначальном объеме от расширения газа, т. е. подниматься без выбрасывания балласта. Если дан шар в 1000 куб. м и весом в 30 пуд. с принадлежностями, пассажирами и с тою частью балласта, которую необходимо оставить для спуска, то такой шар, в обычных условиях, не может подняться выше двух верст, если будет наполняться обыкновенным светильным газом. При наполнении же водородом этот самый шар может подняться на высоту 7 верст и даже выше, если водород будет мало смешан с воздухом при добывании и если шар хорошо держит газ. Шар в 2000 куб. м при обычных способах устройства может подниматься гораздо выше 2 верст, даже и с обыкновенным газом,

---

о предмете, потому что в каждом отдельном случае условия как на земле, так и в атмосфере будут отличаться от здесь взятых. Особенно существенно влияние температуры на земле. Широта места и высота над уровнем моря при надлежащей выверке анероида не окажут влияния.



Аэростат, на котором поднялся Д. И. Менделеев во время солнечного затмения. За несколько минут до подъема.

а с несколько более облегченным газом, имеющим плотность около $^1/_3$, Глешер на своем аэростате поднимался, как сказано ранее, до высоты больше 9 верст. Объем его шара был в 2500 куб. м.

Отсюда ясно, что для наблюдения солнечного затмения при обычных, более или менее мне известных аэростатах, имеющихся в Петербурге, нужно было требовать наполнения аэростата водородом, если мы желаем подняться выше 2—3 верст, т. е. на такую высоту, где шансы закрытия солнца облаками уменьшаются уже в значительной мере. Это была одна из тех причин, по которым я не мог согласиться на подъем из Твери, и пожелал для наблюдения солнечного затмения иметь шар, наполненный водородом. Такой шар можно было получить в то короткое время, какое оставалось до затмения, только через посредство военного министерства, где для военных целей имеется запас аэростатов и особых приборов, способных к перевозке и быстрому приготовлению водородного газа. Таким образом моя мысль невольно обратилась к военным аэростатам. Но существовали и другие соображения, приведшие меня к той же мысли. Я их изложу с полною отчетливостью для того, чтобы были очевидны мотивы, заставившие меня настаивать именно на полете с помощью военного аэростата.

Во время ясной погоды на аэростате, конечно, можно видеть полное затмение может быть яснее, чем с земли, но за то на аэростате нельзя применять многих измерительных приборов, потому что такие приборы требуют прочной установки, какой нельзя вовсе получить в воздухе. А потому, при ясной погоде, с аэростата нельзя было надеяться достичь какого-нибудь ценного научного приобретения по отношению к изучению затмения. Невозможность иметь на аэростате точные измерительные приборы составляет такое обстоятельство, которое нельзя было упустить из вида. Хлопот же и расходов для аэростатического поднятия весьма не мало, а потому было полезно к прямой цели поднятия присовокупить другую побочную цель, достижение которой могло бы хоть сколько-нибудь оправдать материальные затраты, необходимые для перевозки и наполнения шара. Этим соображениям вовсе не мог удовлетворить подъем шара из Твери. Подъем же из Клина на военном аэростате представлялся мне полезным с той стороны, что оставалось очень мало времени для отправки и наполнения шара в довольно отдаленное место. Такой случай должен быть отличным средством для испытания военного аэростата, потому что во время войны такие случаи, как раз, должны будут встретиться. Нужен будет аэростат в данное время на далеком расстоянии от того места, где он хранится. Другими словами, я хотел к главной цели, а именно к наблюдению затмения, присовокупить другую цель—

испытание существующих аэростатических приспособлений в мирное время для тех целей, для которых они будут служить во время войны. Мне казалось, что военный министр согласится на ходатайство технического общества, потому именно, что увидит эту сторону предмета и сочтет полезным, содействуя научной цели, испробовать заготовленные аэростаты; такое упражнение может кое-что уяснить в деле, еще сравнительно новом и мало обследованном в практических случайностях даже теми лицами, которые посвятили свою деятельность этому предмету. Хотя я лично не знал новых военных аэростатов, но был уверен, что лица, приставленные к этому делу, подробно изучив предмет в его современном состоянии, устроили все принадлежности с такими приспособлениями, которые представят не только полную безопасность полета, но и возможность высокого поднятия при помощи наполнения шаров водородом. И я вперед должен сказать, что эта уверенность оправдалась на деле, т. е., что тот военный аэростат, который мне служил для полета, принадлежит к числу отличнейших экземпляров между многими снарядами этого рода, мне известными. Аэростат „Русский", служивший для моего подъема, устроен превосходно и составляет отличное орудие, которым, в случае войны, Россия может воспользоваться никак не менее, чем воспользовалась Франция во время войны 70 года. Избирая местом подъема Клин, я имел в виду не только близость этого города к месту моего жительства летом, но также и то соображение, что отправка военного аэростата в Тверь или Клин совершенно безразлична. Все дело в том, чтобы получить поучительный опыт быстрой отправки аэростата на далекое расстояние и своевременного наполнения к определенному моменту поднятия. Такой случай во время войны, конечно, всегда представится и следовательно расходы, необходимые для полета, окупятся опытом, который получит ведомство, заведующее аэростатами.

Отправив свою телеграмму, я стал вновь перечитывать то, что было под руками, а также свои заметки, касающиеся воздухоплавания, потому что мне необходимо было возобновить в памяти ранее узнанное, чтобы быть готовым к случайностям, и главное, чтобы, при согласии военного министра доставить военный аэростат, иметь возможность сказать свое посильное мнение о том состоянии, в котором быстро снаряженный аэростат может сыграть свою роль.

Ответ, согласный с ожиданиями, был получен мною от секретаря технического общества В. И. Срезневского в ночь на I августа. Вот эта телеграмма: „Поднятие военного водородного шара из Клина стараниями Джевецкого и благодаря вниманию министра и властей устроено, высылка готовится не позже вторника, шар 700 метров легко поднимет обязательного военного

аэронавта Кованько, вас и если разрешите Джевецкого от Технического Общества. Срезневский". Телеграмма послана 31 июля. Значит, все дело сделалось в один день.

Итак надо готовиться. Мелькнула мысль ехать в Петербург, чтобы запастись всем, что нужно. Но многое отклонило от этого, а главное, времени было мало и следовало ограничиться тем, что было под руками. Необходимо было особенно подумать о приборах для наблюдения. Хотя был уверен, что всякие принадлежности подъема будут взяты при отправке аэростата, но мне казалось полезным упомянуть в ответной телеграмме о том, что необходим бинокль, особый анероид лично для моего пользования, кроме того, которым будет пользоваться г. Кованько как руководитель аэростата. Еще я просил привезти девиеву лампу, так как думал, судя по многому тому, что было писано пред затмением, что встречу затруднение даже при записи виденного от наступления полной темноты. Обыкновенный фонарь, как известно, опасаются применять при полетах, так как из аэростата во время его поднятия, выделяется горючий газ, могущий воспламениться. Лампа Деви, где пламя окружено металлическою сеткою, устраняет передачу огня. В телеграфическом моем ответе я благодарил, просил Джевецкого ехать вместе и привести бинокль, анероид и девиеву лампу. Кроме того я считал необходимым благодарить со своей стороны военного министра за то доверие, которое необходимо было оправдать.

Теперь следовало, во-первых, сообразить некоторые подробности полета, а во-вторых, приготовиться к наблюдениям. Аэростат будет размером в 700 куб. м, как мне теперь стало известно. Подобные аэростаты с принадлежностями имеют вес не менее 250 кг, или около 15 пуд. Обыкновенно даже немного более, если они устроены прочно. Человек в одежде весит около 70 кг. Следовательно, если нас будет трое, то наш вес будет около 210 кг. С нами должны быть приборы, вес которых я принял равным 10 кг. Для безопасности опускания необходимо было оставить по крайней мере 20 кг балласта, состоящего из песка.

Поэтому я принял общий вес всех неизбежных частей равным 500 кг. Следовало узнать, сколько можно будет взять балласта, если на земле аэростат будет совершенно наполнен газом, и до какой высоты можно будет ожидать подъема, выбрасывая этот первоначальный балласт. Для решения обоих вопросов надо задаться плотностью водорода по отношению к воздуху. Чистый и сухой водородный газ, как сказано выше, в $14^1/_2$ раз легче, чем воздух при том же объеме и при равных условиях давления и температуры. Но такой легкий чистый водород трудно добывать даже в малом виде в химических лабораториях, а плотность водорода, применяемого в аэростатике, не бывает менее $^1/_{10}$ плотности воздуха. Это потому, что отнять влажность или со-

вершенно высушить громадные массы водорода нельзя. Плотность же водяного пара в 9 раз больше плотности водорода. Затем, при начале наполнения аэростата водородом некоторая часть воздуха неизбежно остается в аэростате и подмешивается к водороду. Сверх того, при самодобывании в большом виде воздух из разных частей сложных приборов входит как подмесь к водороду. Самая ткань аэростата не может быть абсолютно непроницаемою, и следовательно часть водорода проходит через ткань, и часть воздуха проникает внутрь аэростата, а потому в водороде, наполняющем аэростат, всегда находится некоторая подмесь водяных паров и воздуха, не говоря уже о других газах, в особенности о сероводороде, который всегда составляет подмесь водорода, добываемого из железа и купоросного масла, так как эти вещества, применяемые в больших количествах, содержат некоторые подмеси. Следовательно, я должен был принять в расчет за наименьшую плотность водорода $^1/_{10}$. Однако спешность устройства и наполнения могли служить к тому, что плотность от подмесей будет еще более возрастать, так что я принял возможное возрастание плотности до $^1/_5$ противу воздуха. Если представим только, что на 700 куб. м газа, наполняющего аэростат, 100 куб. м будут иметь плотность воздуха, то средняя плотность газа и будет именно равна $^1/_5$ плотности воздуха. Летом на земной поверхности 1 куб. м воздуха весит около $1^1/_5$ кг, а так как равновесие аэростата может наступить лишь тогда, когда сумма веса его самого и газа, его наполняющего, равняется весу вытесненного воздуха, то, приняв плотность водорода равною $^1/_{10}$, будем иметь вес 700 куб. м газа равным 84 кг. Вес же вытесненного воздуха будет 840 кг. Разность равна 756 кг; следовательно шар, кроме 500 кг своего и нашего веса, может поднять еще до 256 кг или около 15 пуд. балласта. Если же плотность газа будет лишь в $^1/_5$ воздуха, то балласт для равновесия на земле, при полном наполнении шара будет весить только 172 кг, или около 10 пуд. Но и с таким количеством балласта лететь еще можно, хотя высоко подняться конечно уже нельзя. На высоте 2 верст 700 куб. м воздуха летом весят около 700 кг. На высоте 4 верст — около 550 кг. На высоте 6 верст — около 420 кг. Это потому, что при подъеме на высоту воздух сильно расширяется от уменьшения давления, хотя отчасти и уплотняется от понижения температуры. На высоте 2 верст температура бывает около 0°, если на земле она 15°, а на высоте 4 верст она уже ниже, около 5° холода. На высоте 6 верст она будет уже около —12°, т. е. холод уже значителен. Следовательно, на предполагавшемся аэростате можно было рассчитывать подняться до высоты 4 верст, если плотность водорода будет $^1/_{10}$. Если же плотность водорода будет $^1/_5$, то поднятие с тремя пассажирами может быть до $2^1/_2$ верст, потому

что тогда вес 700 куб. м газа был бы около 130, а с весом шара и пр. получим общий вес около 630 кг, вес же вытесненного воздуха на высоте $2^1/_2$ верст, судя по сказанному—около 630 кг. Следовательно, я мог рассчитывать на подъем лишь на 2, много 4 версты, а облака носятся часто гораздо выше. Поэтому вероятность встречи облаков не устранялась при той обстановке, которую предстояло иметь. Но так как затмение должно было происходить утром, а известно, что утренние туманы или лежащие на земле облака часто высоко не поднимаются, то была еще надежда с шара произвести наблюдения даже в том случае, когда с земли нельзя было бы видеть затмение. Вследствие этих соображений я уже отказался от надежды подняться высоко и решил сделать лишь такие наблюдения, которые предполагал произвести, живя в деревне. Прежде всего мне казалось очень полезным измерить угломерным прибором величину короны по нескольким направлениям в том виде, в каком можно ее наблюдать невооруженным глазом. Описания и рисунки короны, которые мне встречались, в этом отношении значительно разноречивы. На иных размеры короны превосходили раза в два диаметр солнца. На других же световое кольцо короны было шириною менее радиуса солнца. С одной стороны, можно было думать, что различие в размерах зависит от различия тех средств, при помощи которых производились наблюдения: простым ли глазом или через трубу большого размера, дающую возможность видеть такие слабоосвещенные части короны, которые простой глаз не может наблюдать; или, наконец, фотографическими способами можно видеть и такие части светящихся предметов, которые дают еще работающие на пластинке лучи, вовсе невидимые глазом, так называемые ультрафиолетовые лучи. Но с другой стороны, можно было думать, что различие в рисунках зависит от изменчивости самой короны. Сведения о том, изменяет ли корона свою форму, или остается в своих размерах постоянною, представляют одни из тех вопросов, которые желательно было настоятельнейшим образом решить при наступающем затмении. Кроме того по форме короны можно уже отчасти судить о ее природе. Если корона так или иначе связана с солнечною атмосферою, она должна быть у экватора солнца шире, более, чем у полюсов. Если же корона есть собрание падающих на солнце аэролитов, то никакого соответствия между шириною и осью вращения солнца ждать нельзя. Словом и здесь, как всюду, надо было знать прежде всего форму, чтобы судить о содержании.

Вследствие этого я, прежде всего, позаботился об устройстве такого угломерного прибора, который давал бы легкую и скорую возможность, даже с аэростата, во время его вращения, произвести измерения размеров короны. Убедившись в том, что всякие угломерные снаряды, снабженные трубами, зеркалами и другими

приспособлениями для точной установки, не могут служить для достаточно быстрых и уверенных определений, тем больше, что по ним требуется делать отчет углов, а для этого нужно освещение и много времени, я поэтому сам устроил простой угломерный снаряд в виде деревянного легкого конуса длиною около 300 мм. В узком его конце, около срезанной вершины конуса, сделано тонкое отверстие для зрачка глаза, а на широком конце помещена сеть, состоящая из волосков, натянутых друг другу параллельно и в перекрестном направлении. Зная угловые расстояния этих волосков, я мог, как показал и опыт, весьма быстро определять с точностью в минутах угловые размеры видимых предметов. Устроив из бумаги изображение, подобное солнцу с короной, и поставив его на такое расстояние, чтобы угол зрения был около полуградуса по отношению к размерам солнца, т. е. соответствовал бы действительному угловому диаметру солнца, я убедился в том, что в течение полуминуты я могу произвести четыре измерения и четыре соответственных записи. Следующие полминуты времени затмения я назначил на вычерчивание формы короны при помощи приготовленных для того соответственных кружков. Еще полминуты времени я назначил для спектроскопического наблюдения при помощи отличного ручного спектроскопа Браунинга, который у меня был приготовлен для наблюдения короны. Если бы удалось отыскать в какой-либо части короны, сверх тех светлых зеленых линий, которые уже замечены некоторыми наблюдателями, еще другие светящиеся линии, то было бы гораздо больше уверенности в присутствии накаленных газообразных тел в массе короны. Известно, однако, что она дает и полный спектр отраженного света, это дает убеждение в том, что в короне находятся твердые тела. Оно, впрочем, должно быть даже в том случае, когда корона не составляет собрания падающих на солнце твердых космических тел, а образует лишь внешнюю газовую оболочку солнца (хотя это и мало допустимо по законам центробежных сил и скорости вращения солнца около оси), потому что в этой оболочке, как и в газовой оболочке всякого другого светила, температура должна понижаться по мере удаления от поверхности и, следовательно, испаряющиеся из солнечной массы вещества должны в верхних частях его атмосферы находиться в виде твердых и жидких тел, подобно тому, как в нашей атмосфере висят облака из жидкой и снегообразной воды. Затем, по моему предположению, оставалось бы еще время для того, чтобы успеть сделать отчеты на термометрах и видеть в момент открытия солнца состояние движущейся тени, в наблюдении которой также можно было ждать некоторого интереса. Начало поднятия я предполагал сделать лишь за несколько минут, а именно не более как за пять минут до момента начала полного затмения. Если бы отлет

назначить раньше, то аэростат могло бы унести ветром далеко от Клина и ближе к краю полосы полного затмения, где его длительность уменьшается. В Клину затмение должно было длиться около двух минут, а на юг от Клина, всего в расстоянии около 70 верст, кончалась полоса полного затмения и начиналась полоса серпообразного затмения. Скорость же движения аэростатов бывает иногда весьма значительна, хотя бы ветер на земной поверхности и был слаб. Среднюю скорость движения аэростатов в воздухе определяют вообще около 40 верст в час, но бывают очень часто скорости, превышающие 100 верст в час. Следовательно, если бы мы поднялись хотя бы за четверть часа до начала затмения, мы легко могли бы лишиться возможности две минуты наблюдать полное затмение. Так как затмение в Клину начиналось по среднему местному времени в 6 час. 40 минут, то я предполагал подняться в 6 час. 35 минут, значит и часы следовало установить с возможною точностью. Эта точная установка моего хронометра была сделана пред полетом в Клину, потому что там оказался в это время астроном пулковской обсерватории. Предполагал далее, что в те пять минут, которые пройдут от начала подъема до начала полной фазы затмения, я успею не только привести в порядок свои приборы, но и осмотреться и придти в то нормальное состояние, которое необходимо было сохранить для того, чтобы в короткое время видеть все, что должно, с наибольшею отчетливостью. Для этой последней цели я заранее уже решился явиться к аэростату не ранее, как минут за десять до отправления. Надо было думать, что при отлете соберется много народа и среди них много друзей, тем более, что поднятие аэростата из Клина составляло событие, в этом уголке совсем небывалое. Уж слышно было, что многие соседи и знакомые собираются ехать смотреть аэростат, так как газеты успели уже оповестить о том, что полет из Клина предположен.

В воскресенье, 2 августа, я закончил свои частные дела в имении; тем более это нужно было сделать, что тотчас же после затмения мне следовало отправляться в Манчестер на собрание британской ассоциации или съезда естество-испытателей, куда пригласили на этот раз многих иностранных ученых и, между прочим, профессора Меншуткина и меня. Понедельник я посвятил устройству, изучению и выверке приборов, необходимых при полете, а во вторник надо было, судя по телеграмме, ждать шара в Клин. Забыл сказать, что накануне была получена телеграмма от С. К. Джевецкого, в которой сказано, что „для обеспечения успеха, драгоценного для науки полета и возможности подняться выше" он предпочитает „подняться в Твери со Зверинцевым на шаре технического общества". Далее в телеграмме сказано, что в Клин „командируется опытный аэронавт Кованько

со всеми приборами и электрическою лампочкою; все надеюсь поспеет ко времени". Надо было поэтому думать, что С. К. Джевецкий также расчел условия подъема троих и увидел, что при этом нельзя надеяться на высокий подъем; тем более, что шар имел объем, как я узнал потом, не 700 куб. м, а только 640, т. е. его подъемная способность, при прочих равных условиях, была еще меньше, чем выше разочтенная. Подъем вдвоем представлял больше надежд на успех, чем было прежде.

Во вторник отправился в Клин, чтобы встретить г. Кованько с аэростатом и условиться в некоторых подробностях. В Клину, прежде всего, отправился к уездному воинскому начальнику. Он ничего не слыхал и никаких сведений не получал о прибытии аэростата или г. Кованько. Тот же самый ответ дал мне и местный исправник, а уже почтовый и курьерские поезда из Петербурга пришли. Был момент сомнения. Отправился однако на станцию железной дороги и там от начальника станции узнал, что, хотя никто из лиц и не приехал и аэростата нет, но что прислана на имя г. Кованько серная кислота в количестве около 500 пуд. Это убедило, что полет непременно будет, потому что иначе незачем было бы такую массу груза отправлять так далеко. По телеграфу узнали, что г. Кованько не отправлялся еще, но можно было думать, что он отправится сегодня с почтовым или курьерским поездом, о чем и послана телеграмма. Оставалось много времени и я его желал употребить для переговоров с членами той комиссии русского Физико-Химического Общества, которая собралась у графа Олсуфьева для наблюдения затмения. Ехать из Клина на лошадях туда было далеко, но благодаря внимательности начальника клинской станции железной дороги я мог воспользоваться проходившим товарным поездом и с ним отправился на станцию Подсолнечную, откуда приехал в имение графа Олсуфьева Обольяново, отстоящее примерно на 25 верст от станции. Там я встретил профессора Н. Г. Егорова и гг. Вычеховского, Страуса, Роговского и других наблюдателей, все уже приготовивших к предстоящему солнечному затмению. В прекрасном и благоустроенном поместье графа все наши наблюдатели и все им необходимое было устроено с большим вниманием и интересом к научному успеху. Любезность графа отозвалась и на мне в том отношении, что он мне предложил воспользоваться его карманным анероидом, показывающим высоты до $2^1/_2$ верст, тогда как мой давал высоты только до $1^1/_2$ верст. Этот анероид графа Олсуфьева я успел сличить затем не только со своим выверенным анероидом, но и со ртутным барометром, бывшим у меня в имении, так что мне стали известны те поправки, которые должно было придать к показаниям анероида, чтобы получить истинные давления. Во время же полета мне удалось сличить анероид графа с тем анероидом, который был на аэро-

стате и показывал еще бóльшие высоты. Цель моей поездки в Обольяново состояла, главным образом, в том, чтобы узнать, не могу ли я во время поднятия сделать еще какие-нибудь из наблюдений, мне не-приходивших на ум. Мы остановились также на рассмотрении возможности фотографирования короны с аэростата. Однако пришли скоро к убеждению в том, что времени на это нужно будет потратить много, а успеха ожидать было весьма трудно, тем более, что нельзя было употребить иного фотографического прибора, кроме коротко-фокусного, и ориентировать его по отношению к солнцу следовало не иначе, как с рук, что не могло дать достаточно точного изображения.

Упомяну здесь об одном поразившем меня известии, полученном от профессора Егорова.

К нему пришло письмо с юга России от одного священника, который в своей молодости имел случай видеть полное солнечное затмение, идя в поле и при полном отсутствии облаков. Если не ошибаюсь, это было в 1851 году. Священник очень обстоятельно описывает, что после начала полного затмения он увидел сквозь луну блеснувший луч солнца; но вскоре свет исчез и на этом месте явилось как бы белое облачко. Он пишет, что явление это было для него столь ново, и он так убежден в достоверности того, что видел, что считал полезным известить об этом комиссию русского Физико-Химического Общества, занятую исследованием затмения. Как ни кажется на первый взгляд мало вероятным подобного рода известие, но я думаю, что нечто подобное могло случиться и согласно с теми наблюдениями, которые давно опубликованы Гершелем. Он видел несколько раз, после закрытия звезд луною, изображение звезды сквозь массу лунного края. При этом звезда несколько изменяет свое положение и это дает уверенность в том объяснении, какое нужно дать явлению. На луне имеются высокие горы. Ее край также не лишен гор. Между горами должно признать возможность существования глубоких долин или трещин, тем более, что луна, без всякого сомнения, находится уже в периоде весьма сильного охлаждения. Заметной по преломлению атмосферы на вершинах лунных гор нет, судя по прямым наблюдениям. Атмосфера и на вершинах наших высочайших гор чрезвычайно редка. Над Гималайскими горами остается менее одной трети всей нашей атмосферы. Масса луны мала, следовательно и атмосфера, которая находится около луны, должна быть сравнительно с земною очень мала, — и при низкой температуре всей луны, атмосфера, главным образом, должна была собраться в долинах и трещинах между горами, если только на луне есть атмосфера, как, впрочем, думать, мне кажется, должно. И вот, через такие то долины и трещины мог проникать от преломления луч света, так сказать, идя по кривой линии, и вследствие этого могло случиться такое положение луны, что

луч солнца прорвался сквозь массив края луны. Упоминание о том, что после прохождения луча на этом месте было видимо как бы светящееся облачко, согласовалось с этим предположением, потому что при малейшем перемещении в относительном положении луны свет уже не мог проходить по кривизне долины, а должен был затем скользнуть и отразиться от ее боков, что и должно было осветить глубокую атмосферу долины и дать вид светлого облачка на темной, к нам обращенной, стороне луны. Так как вопрос о существовании атмосферы на луне принадлежит к весьма важным во множестве отношений задачам естествознания, как я старался объяснить в основах химии, то это известие, пришедшее так неожиданно, прибавляло новый интерес к наблюдению полного солнечного затмения. Замечу здесь, что на Урале в нынешнее затмение, как мне передавали, также видели просвет на луне. Очень было бы важно, если бы это оправдалось.

Как ни спешил, все же запоздал возвратиться к поезду, проходящему чрез Подсолнечную, чтобы ехать обратно в Клин, а потому из имения графа Олсуфьева прямо отправился к себе, для того, чтобы на другой день поехать в Клин.

Верст 70 проселочных дорог, которые я проехал в этот день, к моему удивлению, нисколько меня не утомили. Это зависело, конечно, от напряжения и возбуждения, при которых усталость, как известно, не имеет места. Дома я получил телеграмму, что г. Кованько с командой, шаром и всеми приборами отправился во вторник из Петербурга. Рассудив, что в первые часы приезда у всех лиц будет много дела с одной разгрузкой и перевозкой приборов и что напрасно будет мешать неизбежным хлопотам, я отправился в Клин довольно поздно, часу в третьем. На дороге встретил моего друга К. Д. Краевича, который меня уговорил возвратиться домой, потому что он видел в Клину г. Кованько, команду и начало всех приготовлений к наполнению шара. Он уверил меня вновь в том, что в г. Кованько я буду иметь спутника не только весьма энергического и страстно любящего аэронавтику, но и очень опытного, даже весьма находчивого аэронавта; словом, что можно быть вполне спокойным и лучше день пробыть дома, чтобы завтра ехать уже окончательно в Клин. Разговор с К. Д. Краевичем поддержал мое убеждение в том, что в момент усиленных хлопот быстрого наполнения аэростата и устройства всех приспособлений лучше не мешать главным действующим лицам.

Утром 6 августа, в четверг, накануне затмения, вместе с К. Д. Краевичем мы уже сели в экипаж, как приехал еще один друг — художник И. Е. Репин. Он также был около аэростата, видел начало его наполнения, говорил со многими лицами и с самим г. Кованько, уверил в том, что все в порядке и можно надеяться на благоприятный исход начавшегося наполнения. Хотя

и жаль было бросить такого гостя, но надо было ехать. И. Е. Репин однако скоро за нами также прибыл в Клин, где в дождь под зонтиком рисовал и карандашом, и красками ту своеобразную картину, которую представляло место наполнения аэростата и окружавшая масса народа.

Приехавши с К. Д. Краевичем в Клин, мы прямо поехали на это место. Это — пустырь, лежащий на северо-западном краю города, около Ямской слободы, между Купеческою улицею или шоссе, идущим по направлению к Петербургу, и полотном железной дороги, именно направо от него, если ехать из Клина в Петербург. Отправляясь со станции железной дороги в город, должно проехать по другому шоссе, от которого этот пустырь лежит влево. Место было выбрано отличное, город и станция были близко, и тут был пруд с водою, которая была необходима в большом количестве для смешения с серною кислотою и для охлаждения выделяющегося газа. Часу в третьем дня мы подъехали к шару и видели его уже наполненным примерно до трети. Кругом стоял народ, который отделяли легкие жерди, ограждавшие место расположения самого аэростата и приборов для добывания газа. Близ аэростата, удерживаемого, как это обыкновенно делается, мешками с песком, привязанными к сетке, устроен, кажется из старых шпал, возвышенный помост, где расположены большие металлические котлы, служащие для смешения воды с серною кислотой и для добывания водорода действием этой разбавленной серной кислоты на железные стружки, в сосудах помещенные. Из сосудов водород идет сперва в охладник или промыватель, а потом в особый прибор для сушения, содержавший, как мне сказали, хлористый кальций. С той стороны, с которой дул хотя слабый, но неровный ветер, устраивали из жердей и брезентов защиту. Она должна была обезопасить аэростат и защитить хотя до некоторой степени его от напора ветра. Команда кругом аэростата хлопотала и состояла из саперов. Общая картина была полна живого интереса и немудрено, что И. Е. Репин захотел зарисовать некоторые ее подробности. А погода стояла серая, дождливая и неприветливая. Пробравшись за изгородку, я неожиданно встретил у аэростата моего сына, мичмана, который был в море и получил отпуск только потому, что должен был полечиться, упав в море. Здесь я познакомился с А. М. Кованько и должен сказать, что первое впечатление совершенно оправдало то, что в последние два дня я слышал неоднократно относительно этого аэронавта. Он распоряжался делом около шара, а приготовлением водорода заведывал механик г. Гарут. Тут же был и неутомимый В. И. Срезневский, секретарь Русского Технического Общества, который собирался во время затмения и наполнения шара произвести несколько фотографических снимков. Кучка солдат гальванической роты

была занята делом около шара. Одни качали воду в охладник и в приборы; другие тащили бутыли с купоросным маслом; третьи ставили заграждения от ветра; один, лежа под шаром, выправлял мягкую трубу, проводящую газ во внутренность шара после его высушивания. Мне сообщили, что прибор для добывания газа взят был старый, крепостной, тяжелый, так как новые, более легкие и удобные, паровые, как их называют потому, что они действуют при помощи накачивания, производимого паровою машиною, — были отправлены на маневры и на смотр, словом, несли свою военную службу вместе со всеми остальными военными аэростатами. Несколько фотографов уже снимали картину аэростата. Вблизи стояла еще непривязанная к аэростату корзинка и лежал круг, при помощи которого веревки сетки, охватывающей аэростат, скрепляются с корзинкой.

Относительно сущности дела я узнал, что в распоряжении было около 500 пуд. купоросного масла и около 200 пуд. железных стружек. Далее, что аэростат с принадлежностями и корзинкой весит около 17 пуд., что он носит название „Русский", сделан во Франции и снабжен особым, прекрасно устроенным клапаном системы Герве, открывающимся кверху и получившим премию в Париже от тамошнего аэронавтического общества при состязании разных систем клапанов. Далее я узнал, что вместо девиевой лампы действительно взята электрическая лампочка с батареей, при помощи которой г. Кованько хотел зарисовывать форму короны во время момента полного солнечного затмения. Лампу эту при затмении, как увидим, применять было незачем. Бинокль привезли весьма сильный, состоящий из двух длинных труб, но я должен сказать, подобные сильные бинокли, какие употребляются моряками и инженерами на суше, мало пригодны для наблюдений с аэростата при поднятиях, сколько-нибудь высоких. Я пробовал употреблять такой бинокль и предпочел затем прямо смотреть глазами, потому что свету доходило мало. Лучше иметь, по моему мнению, бинокль обыкновенной конструкции, только с хорошими большими стеклами, потому что они дают гораздо больше света. С высоты трех верст земля кажется покрытой все же некоторым туманом, и следовательно для наблюдений подробностей нужно собрать значительное количество света, а иначе, хотя размеры и увеличиваются, но уменьшаются ясность и отчетливость, и наблюдатель выигрывает мало. Что касается до анероида, то А. М. Кованько взял, во-первых, большой анероид Технического Общества, бывший несколько лет тому назад у меня в употреблении и мною проверенный, а во-вторых, барограф, т. е. самопишущий анероид, записывающий, если пущен в ход часовой механизм, давление на листе бумаги, так что независимо от наблюдателя остается след от показаний этого прибора, что облегчает все расчеты и соображения, отвечающие полету. Узнал также, что карты мест-

ности были забыты, и мне пришлось затем разыскивать хоть какую-нибудь карту Клинского уезда. Благодаря внимательности местного исправника я получил большую стенную карту уезда, но ее нельзя было взять с собою, а потому с нее снята была копия, относящаяся к двум частям, лежащим направо и налево от полотна железной дороги.

Так как для добывания 700 куб. м водорода достаточно около 50 пуд. железа и около 200 пуд. купоросного масла, то присланное количество составляло запас, обеспечивающий успех полного наполнения аэростата водородом. Но, признаться, меня поразило то обстоятельство, что водород уже в значительном количестве был добыт и аэростат значительно наполнен, хотя оставалось до времени отлета еще часов 15. Когда я спросил о причине такого раннего начала наполнения, то мне объяснили, что приборы для добывания, которые пришлось взять, отличаются тем, что дают сравнительно медленно газ, и для большей уверенности наполнения предпочли начать его заранее. Должен признаться, что сделавши вопрос о причине начала раннего наполнения, я изменил своему первоначальному намерению — не вмешиваться в распоряжение лиц, стоящих у дела, тем больше, что главный распорядитель всего дела А. М. Кованько должен был лететь вместе, следовательно принимал все необходимые предосторожности, и его не следовало расстраивать никакими излишними вопросами и замечаниями. Изменивши раз своему первоначальному намерению, я затем уже больше не изменял ему ни разу, тем более, что мой друг, К. Д. Краевич, вполне согласившись с такого рода образом действия, был подле меня и лишь только видел, что я хочу вступить в технические распросы, старался меня воздерживать, т. е. возвратить на правильный и условленный способ отношения к делу. Мы переговорили с А. М. Кованько о необходимых условленных подробностях, и мне следовало подумать о месте ночлега, потому что в таком небольшом городке, каков Клин, нельзя было найти свободного номера в гостинице, да и номеров-то, сколько мне известно, всего только три во всем городе, и они были уже заняты. Приют нам дал А. М. Воронов, клинский городской голова, тот самый, которому этот город обязан многим в своем устройстве после пожара, бывшего в третьем году. У А. М. Воронова к нам пришел тотчас же корреспондент одной газеты, который однакож догадался, что теперь не до него. Устроившись, мы занялись необходимыми приготовлениями, например проверкою времени, снятием карты, наблюдением температуры воздуха и т. п. В. И. Срезневский взял на себя труд снестись по телеграфу с главною метеорологическою обсерваториею по отношению к погоде. На вокзале мы встретили массу народа и между ними обратили на себя внимание велосипедисты, приехавшие в этот день из Москвы на велосипедах.

Как мне передавали, они ездили отыскивать шар, когда он отлетел. Побывали еще раз у шара, убедились, что все благополучно и идет, как следует. Во второй или третий раз бывши около шара, я видел однажды, как мягкая труба, ведущая газ к аэростату, раздулась в виде яйца, что служило указанием того, что проход газа из приборов в шар затруднялся складками и давлением на проводящий рукав. Но я тотчас же увидел, как эту случайность замечали и исправляли немедленно. У шара я узнал, что какая-то из дам, — приезжая или местная, мне осталось неизвестным, — очень убедительно и настойчиво сперва просила, а потом чуть не требовала, чтобы ей дано было место при полете. Она хотела для этого просить разрешения властей и была очень недовольна, когда ей сказали, что никакие просьбы подобного рода не могут быть приняты во внимание. Замечу, что это добрый знак, если дамы стали интересоваться у нас в России аэростатами. Мужчины, конечно, пойдут за ними. И ко мне, в Клину, двукратно обращались с выражением желания отправиться вместе на аэростате. Это желание оба раза высказывалось, сопровождаемое утверждением, что в городе говорят, будто ищут другое лицо, желающее отправиться на аэростате, но не находят такого. Вечером мы все время имели известия о наполнении шара и разобрали несколько вопросов, относящихся к предстоящему полету. Между прочим, с К. Д. Краевичем мы обсудили вопрос темноты во время полного солнечного затмения. Судя по показаниям одних лиц, видевших полное затмение, можно было ждать весьма большой темноты. Другие же лица, бывшие свидетелями полных солнечных затмений, утверждают, что наступает лишь относительная темнота, т. е. свет ослабляется, но остается. Следовало уяснить причину этого на первый раз кажущегося разноречия. Нам казалось, и теперь я уверен в справедливости этого, что могут быть различные условия солнечных затмений, вполне объясняющие различие в освещении. Если место наблюдения лежит глубоко в полосе полного солнечного затмения, если полоса эта широка, а время близко к полудню, и если в полосе тени и в окружающих ее местностях воздух безоблачен, тогда может наступить в действительности большая относительная темнота, потому что рассеянному свету нет повода придти в центральные части полосы затмения. Но если место наблюдения лежит недалеко от края полосы полного затмения, или особенно, если вне этой полосы и в самой полосе будут облака или туман, время же полного затмения утреннее или вечернее, тогда большой темноты ждать нельзя, потому что освещенные солнцем местности будут служить источником света для центральной полосы, так как отраженный от облаков и рассеянный свет, как известно по наблюдениям зари, проникает весьма далеко в атмосфере. Ширина полосы полного затмения на этот раз близ Клина

была около 200 верст. Время же было облачное и туманное и следовательно полной тьмы нельзя было ждать. В этом я до такой степени стал убеждаться, что хотел, но не успел, предупредить о том, чтобы электрической лампочки не брать в нашем путешествии, тем больше, что она вместе с батареей составляла напрасный груз, мешавший подъему. Присутствие света во время затмения в Клину нужно было ждать, в особенности потому, что Клин лежит не в самом центре полосы затмения, а всего в расстоянии около 70 верст до края, где полного затмения уже не существует. Я остановился на этом рассуждении в особенности потому, что очень часто слышал о тех разноречиях в описании явления полного солнечного затмения, которые заставляли многих лиц не доверять ни одному из описаний в достаточной мере. Думают обыкновенно о самообмане или субъективности отношения к предмету описывающего. Но мне кажется, что и помимо этого, относясь совершенно объективно к вопросам, можно в природе дела найти причину разноречия показаний.

Вечером мы убедились в том, что все небо обложено было тучами, моросил дождик и не было никакого следа разъяснения погоды. Условились встать в четыре часа, и я просил к этому времени меня разбудить, но, хотя сплю всегда крепко и меня трудно добудиться, на этот раз проснулся за несколько минут до четырех часов, конечно, вследствие того удивительного явления, которое, вероятно, многие наблюдали над собою: когда нужно к определенному времени встать, организм сам узнает время и просыпается как раз в надлежащий момент. Очевидно, что мозговая деятельность во сне продолжается, как и другие процессы организма. Улетает лишь сознание.

Вставши, обращаюсь к окну, выхожу на балкон и вижу — вчерашнюю же погоду, т. е. облака и моросит, туман. Ветер слаб, но относительно тепло, а именно, около 4 ч. утра было 12°Ц. Эта облачная погода, при отсутствии ветра, служила оправданием для тех многих усилий, которые употреблены были к наблюдению солнечного затмения с аэростата. Если бы погода была, в самом деле, ясною, тогда бы мелькнуло сожаление о напрасных хлопотах, а теперь невольно рождалась мысль о том, что мы с аэростата можем увидеть то, что множество лиц, собравшихся в окрестностях Москвы, не увидит из-за облаков. Примерно за полчаса до назначенного времени отлета, я получил известие о том, что у шара все благополучно, но что ожидавшейся подъемной силы, определяемой балластом в 15 пуд. не оказывается; и можно взять, как мне передали, около 8 пуд.

Это известие я понял в том смысле, что балласт в 8 пуд. будет сопровождать нас двоих в аэростате. С таким балластом можно еще подняться довольно высоко. Во всяком случае вероятность пройти облачный слой была велика, потому что утром,

как известно, облака ходят низко и только днем они постепенно подымаются. Еще недавно, в Швеции, этот вопрос был подробно исследован, и результатом множества наблюдений оказывается что утром облака висят ниже, чем во все остальные часы дня Наблюдение над направлением ветра, сделанное около этого времени, показывало, что на земле направление ветра на ССЗ т. е. ветер дует почти с юга и низко идущие облака движутся в том же направлении. Этим направлением ветра, существовавшим во время подъема, объясняются те попытки отыскать аэростат по направлению к Твери и железной дороге, которые сделаны были после его отлета.

Примерно в 6 ч. 20 м. мы отправились к аэростату. На сером фоне неба или, правильнее, — облаков рисовался в воздухе уже вполне поднявшийся аэростат с привязанной внизу корзинкой. Он слегка покачивался в воздухе и был не вполне раздут газом. У меня мелькнула мысль о том, что, быть может, оттого подъемная сила не велика, что шар намок и недостаточно наполнен. В таком случае, однако, можно было бы подняться и с малым балластом высоко, так как по мере поднятия газ в шаре расширяется и, следовательно, аэростат увеличивается в объеме, не теряя из себя газа, что случается с первого момента подъема, когда аэростат вполне на земле раздут. Иными словами, это значит, что при неполном раздувании аэростата можно и с малым балластом подниматься высоко. Дождя не было, но ткань шара, конечно, отсырела, при поднятии она станет высыхать и это поможет высоте полета.

Кругом аэростата была масса народа и стояло множество экипажей. Проходя к аэростату, я встретил нескольких своих петербургских знакомых, приехавших наблюдать солнечное затмение и вместо него теперь решившихся, так как нечего было другого делать, наблюдать по крайней мере отлет аэростата. При входе в загородку послышались дружные крики. Из них один лишь, признаюсь, мне памятен. Кто-то кричал „bis", и я подумал: хорошо бы, в самом деле, повторить и повторять это торжество науки, хорошо потому, что есть масса чрезвычайно интересных задач, которые можно разрешить только при поднятии на аэростатах. Задачи эти не чужды наших обычных общежитейских интересов, потому что они касаются разрешения понятий о погоде. Аэростатические восхождения Захарова, Гей-Люссака, Тиссандье и особенно Глешера на его „философском аппарате" (т. е. физическом приборе), как он назвал свой аэростат, внесли уже много данных чрезвычайной важности в область метеорологических сведений. Теперь же, здесь в Клину, это торжество науки должно было совершиться пред этой толпой, и пусть она изъявляет свою радость, как умеет и знает. В лице — она чтит науку. Теперь надо действовать и теперь

мне следует помнить, что во мне случайно пред этой толпою и пред множеством тех лиц, которым известно о предполагающемся поднятии, соединились те или другие ожидания большего или меньшего успеха наблюдений. Подходя к аэростату, я был удивлен, встретив массу толпившихся у корзинки лиц, кроме тех ближайших, которые были заинтересованы в деле. При этом считаю не напрасным заметить, что, когда я ранее разных лиц в городе просил о том, чтобы они позаботились о порядке, то не раз слышал в ответ, что беспокоиться не о чем, все понимают, как это существенно, и что неудобно вмешиваться в распоряжение, когда лица особого специального ведомства заведуют всем делом. Я должен при этом сказать, что в действительности, хотя лиц было много, хотя теснота была большая, но везде был виден тот порядок и та порядочность, которых требовали условия дела, а полиции я не заметил.

Не помню кто, при моем проходе, остановил меня и сказал мне на ухо: „Дмитрий Иванович, у аэростата нет подъемной силы. Я вижу, знаю дело; лететь нельзя, уверяю вас, нельзя". Приближаюсь среди толпы, вижу, что А. М. Кованько распоряжается делом и что аэростат держат уже за те веревочные концы, которые идут от его экватора и опускаются до земли. Корзинка, однако, была нагружена мешками с песком. Их вынимают, на место их ставят ранее приготовленную табуретку и кладут доску. На табуретке я предполагал сидеть во время наблюдений, потому что в сидячем положении мне казалось более удобным производить наблюдения, так как обе руки могли быть тогда свободными. Ведь я никогда не летал в свободном аэростате и потому думал, как и многие, что в аэростате существует качка, хоть не вроде морской, а вращение и легкое покачивание, и предполагал, что они будут мешать устойчивости рук при наблюдении, даже, может быть, заставят одной рукой держаться за веревки, а это могло мешать скорости и отчетливости наблюдения. Потому я просил для себя поставить табуретку. Если бы она помешала, ее можно было бы привязать за бортом или просто выбросить. На доске, которую предполагалось положить на края корзинки, я думал расположить все приборы для того, чтобы они были под руками в короткое время полного солнечного затмения. В корзину аэростата поместили и мою небольшую корзинку с приборами. По отношению к ней А. М. Кованько спросил меня, что там находится, и удовлетворился ответом, что там помещены все мои приборы. Все другие приборы были уже укреплены по местам. Анероид и барограф были привязаны на высоте роста человека, так, чтобы быть прямо пред глазами наблюдателя. Немного ниже была привязана батарея с электрическою лампочкою. За бортом я увидел привязанными уложенные в бухты канаты. Один канат был

с якорем. Система этого якоря, устроенного г. Кованько, была своеобразна, и мне казалась она целесообразной, потому что лапы якоря были загнуты почти параллельно направлению самого якоря для того, чтобы при опускании якорь захватил землю только тогда, когда его канат вполне ляжет на землю, а это может случиться только тогда, когда клапан отпирается и аэростат с корзинкой уже ложится на землю. Тут же висел и другой длинный, тяжелый канат, применение которого со времени английского аэронавта Грина оказывает чрезвычайную услугу при спуске. Это так называемый опускной канат или гидроп, как говорят французы, или гайдроп, как следует говорить на языке изобретателя этого прибора. До Грина употребляли при спуске только якоря, и спуск был менее безопасен, чем ныне. Гидроп составляет длинный канат, висящий из корзинки и опускаемый после подъема для того, чтобы при спуске, когда конец каната коснется земли, вес всего прибора через это облегчился и опускание произошло бы медленно с надлежащею осторожностью. Это, так сказать, длинная опорная нога аэростата или мягкий щупалец, идущий от аэростата и смягчающий его падение на землю. Мне очень жаль, что я ни тогда, ни в первые минуты полета не увидал жестянку с водою, привязанную за бортом и снабженную краном для постепенного выливания воды. Висела она с другого бока, куда я не глядел, и если бы я знал о существовании жестянки и воды — я бы вероятно поднялся много выше $3^1/_2$ верст. Обстоятельства дела, все хозяйство аэростата, мне, ведь, не было надобности узнавать, так как со мной ехал ближайший распорядитель, капитан воздушного судна А. М. Кованько. В. И. Срезневский, стоявший подле аэростата, прочитал мне телеграмму, полученную им о погоде. Слышал из нее только последние слова, касающиеся того, что ожидать разъяснения погоды нельзя, а потому пред самым отлетом просил еще раз прочитать мне содержание телеграммы. Ко мне подошел, между другими лицами, А. Н. Сигунов, приехавший из Петербурга как представитель аэростатического отдела Технического Общества. Он мне сказал почти то же, что и кто-то другой сказал уже раньше, т. е., что подъемная сила аэростата оказывается малой и что двоим лететь нельзя. Внутренно я уже раньше решил, что, если двоим нельзя лететь, я полечу один.

Мешки были выгружены. Что нужно взять с собою, находилось уже в корзинке, А. М. Кованько с чрезвычайною легкостью вошел в нее, и когда я его спросил, в исправности ли клапан, он дернул раза три за клапанную веревку и приказал одному из солдат взлезть, для того чтобы развязать нижнее отверстие аэростата, в котором вероятно была привязана та гибкая трубка, через которую водород вводился в аэростат. Отверстие аэро-

стата и после развязки осталось закрытым, конечно потому, что аэростат не был раздут и упругость содержавшегося в нем газа в нижних частях была не более атмосферной. Липкость же оболочки удерживала ее края, так что отверстие аэростата не открылось. В этот момент во мне мелькнула мысль, которую считаю необходимым здесь высказать. Только по указанию А. М. Кованько развязали нижнее отверстие аэростата, так что мы могли бы улететь с завязанным отверстием и тогда, поднявшись быстро на большую высоту, аэростат, расширяясь, мог бы лопнуть, если бы отводящая трубка опять случайно загнулась и газу не дала бы выхода. В устройстве аэростатов это обстоятельство непременно нужно иметь в виду и нижнюю часть аэростата должно делать, по моему мнению, из материи более слабой, т. е. легче разрывающейся, чем остальные части, для того, чтобы трещина, когда она получится от каких-нибудь недосмотренных обстоятельств, вследствие напора внутреннего газа, была отверста книзу. Но важнее всего обратить внимание на то, что в момент отлета у аэронавта и без того много разных забот, а потому нужно, чтобы при наполнении были кроме него самого лица, вполне знающие все подробности дела и с их значением достаточно ознакомленные. В особенности это касается до аэронавтической команды военных аэростатов. Между ними непременно нужно иметь несколько лиц, например в виде унтерофицеров команды или вообще лиц более способных, которые бы раньше сами летали и подробно бы знали все частности аэронавтики. Они ответствуют за все частности, которые нужно соблюсти в момент отлета. Конечно, А. М. Кованько, как А. Н. Сигунову, было известно уже раньше, что аэростат имеет малую подъемную силу, хотя он мне об этом не говорил. Его мысль должна была больше всего сосредоточиться на этом обстоятельстве и мелкие подробности при этом могли ускользнуть от его внимания. Такое же обстоятельство еще с большею вероятностью может случиться во время войны, и нужно, чтобы среди окружающих было несколько лиц, вполне знакомых с предметом и следящих за всеми подробностями. Чтобы мое дальнейшее изложение было понято правильным образом, я считаю необходимым оговориться тотчас же по отношению к разным недостаткам, которые были замечены мною во время подъема из Клина. Мне следует сказать, что случай такой, какой представился теперь в Клину, еще никогда не бывал в аэронавтике. Момент отлета определяется при подъеме аэростатов тем, что люди, которым следует лететь, и между ними аэронавт, распоряжающийся отлетом, осматривают и приводят в порядок все частности и, когда это сделается, тогда отлет назначается и раздается пресловутая команда отпустить удерживающие веревки. Ни в нашем случае, или на войне этого спокойствия, необходимого для последнего

внимательного осмотра, ожидать нельзя. Момент подъема здесь определялся солнечным затмением. На войне он может определиться разными случайными обстоятельствами, такими, как моментальное разъяснение тумана или движение неприятельской колонны в ту или другую сторону, словом, время поднятия будет зависеть, как и здесь в нашем случае, не от воли аэронавта. Следовательно, аэронавт должен будет заботиться о чем-то другом, а не о подробностях, которые, однако, необходимо иметь в виду. Эти подробности должен ведать непременно кто-нибудь другой, мысли которого будут свободны от тех основных забот, которыми наполнена будет голова самого аэронавта. Сверх того, надо же принять во внимание то обстоятельство, что в данном случае, равно как и на войне, лицо, заведующее аэростатом, если оно одно должно будет в течение долгого времени исполнять массу обязанностей, потеряет все свои силы ко времени полета, а в этот самый момент аэронавту нужно иметь все свои силы, так сказать, собранными для предстоящего действия. Главные силы аэронавта должны быть, конечно, сосредоточены к моменту опускания на землю, как к самому критическому во всем полете. В данном случае А. М. Кованько вот уже третий день должен был усиленнейшим образом хлопотать по отношению к чрезвычайно быстрому поднятию аэростата при совершенно особых обстоятельствах. Ему необходимо нужно было, по самому существу дела, отдохнуть перед отлетом. Иначе он, во время полета, не мог бы иметь надлежащего спокойствия и всех своих сил. Если я дальше буду говорить о тех несовершенствах, которые служили причиною некоторых сторон неудачи, то в этом случае имею в виду только содействовать своими разъяснениями накоплению опыта в деле аэронавтическом, в особенности же в применении к военному аэростату. А. М. Кованько так быстро, так предусмотрительно и во всех отношениях разумно вел дело подготовки полета из Клина, что его должно считать лицом опытным в этом отношении. То, что будет излагаться далее, относится вовсе не к нему и не составляет упущения какого-нибудь другого лица. Это есть урок или наука опыта, относящегося к быстрому наполнению аэростатов, назначенных к отлету в определенный момент.

Так как А. М. Кованько распоряжался освободить корзину от мешков с песком, вложить в нее, что следовало, сам вошел в корзину и ничего не говорил о невозможности лететь двоим, то я думал, что подъемная сила мала, но все же для отлета достаточна, а там шар обсохнет и мы поднимемся, куда можно, выбрасывая сперва что придется, если песку будет мало. Эти мысли мелькнули, и, несмотря на подтверждение, мне все еще казалось невероятным отсутствие надлежащей силы в аэростате, наполненном водородом. Разговаривать было не время. Про-

стился с близкими, здесь стоявшими, сказал сыну то, что мне казалось необходимым сказать в последнюю минуту, и, судя по времени, инстинктивно смеренному после входа в изгородь, почувствовал, что отправляться пора.

Когда я сам хотел сесть в корзину аэростата, то не знал, с которой стороны удобнее это сделать. Веревки, идущие вверх от края корзинки к кругу или кольцу, мешали мне, и только благодаря указаниям окружающих лиц, что с угла будет гораздо удобнее войти, мне удалось перешагнуть высокий край корзинки. В первый раз я входил в корзинку аэростата, хотя, правда, однажды поднимался в Париже на привязном аэростате. Теперь мы оба были на месте, и А. М. Кованько распорядился, чтобы, ослабив удерживающие веревки, попробовали, поднимает ли аэростат нас обоих. Веревки приопустили, но не выпустили и тотчас стало очевидным, что нас двоих аэростат не поднимает. Правда, что нас приподняло чуть-чуть от земли, но тотчас же дно корзинки коснулось опять земли, и было очевидно, что ветер своим давлением нас влечет, а не газ своею легкостью уносит нас вверх. Ветер повлек нас на несколько шагов по направлению к пруду, т. е. к северу, и А. М. Кованько распорядился, чтобы аэростат воротили на прежнее место. Тогда я ему сказал, что лечу один, и он оставил корзинку. Видя, что аэростат имеет малую подъемную силу, я выкинул доску и табуретку; вложили сперва три мешка, потом два мешка балласта. Попробовали — аэростат поднимает. Мне хотелось распорядиться о том, чтобы приняли еще все лишнее, что возможно принять, но кто-то из окружающих стал говорить о том, что так лететь не следует, а кто-то другой напомнил о времени, и я сам в этот момент почувствовал, что уже пропущен условленный момент отлета, что следует как можно более спешить. Попросил только дать мне ножик, для того, чтобы своевременно отрезать веревки, удерживающие якорь и гидроп, да обратился к В. И. Срезневскому с просьбою еще раз прочитать телеграмму о погоде. Пишут в газетах, что я прощался. Признаться сказать — этого не помню. Помню только, что во мне было чувство некоторой спешливости, не опоздать к моменту полного затмения. Не помню также, распоряжался ли я или распорядился кто другой, но аэростат отпустили, и я тотчас же увидел, что подъемная сила и при двух мешках балласта мала, потому что аэростат очень медленно начал подниматься от земли. Его потянуло к северу и, вынув из кармана анероид, я тотчас увидел по движению его стрелки, что подъемная сила чрезвычайно слаба. Мешки с песком лежали на дне корзинки. Их лучше всегда привязывать с наружного края корзинки и устраивать таким образом, чтобы высыпание песка совершалось по желанию и с большою легкостью. Тут же нужно было поднять весь мешок,

наклонить его край к борту корзинки и высыпать песок. Я сделал это, но песок не сыпался, потому что он представлял сплошной комок, мокрый и совсем неспособный сыпаться. Прижимая телом мешок к краю корзинки, я увидел, что не могу и этим способом высыпать песок, бросать же весь мешок сразу я опасался, чтобы не получить чересчур быстрого поднятия, грозящего различными случайностями. Поэтому пришлось опустить мешок опять на дно корзины и обеими руками горстями чернать песок и выкидывать его для того, чтобы подняться по возможности скорее выше.

Здесь я пока остановлюсь для рассмотрения вопроса о том, отчего произошло столь неожиданное обстоятельство, что аэростат, в котором предполагалось сперва лететь троим, не мог поднять даже двоих, и с одним пассажиром можно было отправить только два мешка песку, в которых, вместе взятых, было разве только два, а то, по всей вероятности, и менее двух пудов? При незнакомстве со всеми условиями и обстоятельствами явление это может остаться темным, а потому я считаю своею обязанностью подробно остановиться на причинах, мне кажущихся уважительными. В начале статьи я упоминал уже о том, что многие обстоятельства влияют на подъемную способность аэростата и на высоту поднятия. Рассмотрим же возможные причины, уменьшившие подъемную силу аэростата противу той, которая рассчитана выше. Мой расчет касался аэростата в 700 куб. м. В действительности же аэростат „Русский" имеет емкость, как я узнал после, только в 640 куб. м. Притом он не был вполне раздут, т. е. содержал еще меньше водорода. Судя по форме аэростата на фотографии, которая снята с него перед моментом отлета фотографом от фирмы г. Дьяговченко в Москве, можно до некоторой степени судить о том, что не более как одна пятая газа не была впущена в аэростат, т. е. что в нем содержалось газа не 640 куб. м., а только около 500 куб. м. Есть мнение в аэронавтике, которым рекомендуется никогда не наполнять аэростат весь газом, если он назначен для более или менее высокого подъема. И причина этого мнения понятна: вероятность разрыва через это уменьшается. Количество газа, выходящего напрасно в воздух из аэростата, также тогда убывает. Высота же подъема нисколько не уменьшается, потому что при подъеме даже до 4 верст более трети газа должно выйти из аэростата, если он будет на земле наполнен до полного раздувания. По расчету или случайно произошло неполное раздувание отлетевшего аэростата, мне неизвестно, и оно совершенно неважно здесь для существа дела, потому что, если бы в аэростате содержалось только 500 куб. м водорода и если бы его плотность была равна $^1/_{10}$ плотности воздуха, то и тогда вес аэростата с газом был бы равен:

Аэростат с принадлежностями около	280 кг
Балласт	40 „
Пассажир и приборы	80 „
500 куб. м водорода	60 „
Сумма	460 кг

А вес воздуха, вытесненного аэростатом, равен 600 кг, потому что вес одного куб. метра влажного воздуха, при температуре около 14° и давлении около 750 мм, как это было около момента отправления, — близок к 1.2 кг. Поэтому оставалось бы на земле запасной подъемной силы не менее 140 кг или около 8—9 пуд. Следовательно, аэростат должен был бы иметь на земле еще подъемную способность, достаточную для поднятия А. М. Кованько вместе со мною, даже в том случае, если бы его наполнение ограничилось 500 куб. м водорода. Следовательно, не от этой неполноты раздувания аэростата зависела малая подъемная сила его. Только две причины могут объяснить малую подъемную силу аэростата. Эти две причины суть: вес самого аэростата и всех его принадлежностей, увеличившийся от мокрой погоды, которой он был подвержен два дня, и качество газа, содержавшегося в момент подъема в аэростате. Вес аэростата, без всякого сомнения, от дождя увеличился. Хотя ткань аэростата была прекрасна по своей чрезвычайной плотности и отлично покрыта лаком, возобновленным, как я узнал в Клину, пред самым отправлением, но тем не менее и она должна была увеличиться, хотя сколько-нибудь, в своем весе от постоянного дождя, который моросил в Клину весь прошлый день. Но особенно должны были намокнуть веревки, из которых сплетается сетка аэростата, его охватывающая со всех сторон и несущая те веревки, к которым прикреплена корзинка. Также должна была, хоть сколько-нибудь, намокнуть и корзина, хотя она была защищена от дождя. Как велика была общая прибыль веса всего аэростата, сказать конечно нельзя, но после возвращения аэростата в Петербург, с аэростатом и его принадлежностями был сделан, по словам А. М. Кованько, опыт погружения его в воду, для того, чтобы убедиться в том, сколько воды может удержать аэростат. Оказалось при этом, что аэростат в состоянии удержать 8 пуд. воды. Конечно нельзя думать, чтобы в момент отлета на аэростате было около 8 пуд. воды, вероятно, меньше; но все же можно думать, что пудов около 5, даже 6 прибыло на аэростат. 6 пуд. составляет 100 кг, и следовательно в намокании аэростата должно искать первую причину его слабой подъемной способности. Но она одна мне кажется отнюдь недостаточною. Необходимо искать более важной причины недостаточности подъемной силы — в свойствах водородного газа, аэростат наполнявшего. Если бы аэростат был намочен

100 кг воды в момент отлета, то в верхних слоях атмосферы, на высоте более 3 верст, где аэростат оставался слишком два часа и где, как известно из множества наблюдений, влажность никогда почти не доходит до насыщения, где притом аэростат подвергался прямому действию солнечных лучей и имел, следовательно, всю возможность высохнуть при той огромной поверхности, которая ему свойственна, — он должен был бы потерять эти 100 кг и тогда бы он чрезвычайно высоко поднялся в атмосфере. Этого не случилось. Аэростат, правда, от высыхания поднялся, как увидим далее, но поднялся очень немного, и по той наибольшей высоте, в $3^1/_2$ версты, до которой аэростат поднялся, можно сделать довольно точный расчет плотности водородного газа, аэростат наполнявшего. На этой высоте, судя по наблюдаемому давлению и температуре, куб. метр воздуха весил 830 г. Допустим, что аэростат тогда высох, но еще не вполне, и весил не 17 пуд. или 280 кг, а 300 кг. Еслиб мы приняли вес аэростата в 280 кг, то тогда бы плотность водорода была еще больше, следовательно, допуская неполное высыхание, мы уменьшаем расчет плотности водорода, а не увеличиваем. Следовательно, примем вес аэростата 300 кг в верхней точке полета. Мой вес со взятыми мною приборами равняется 76 кг, но я допускаю вес 80 кг, считая воду, которая не была вылита из жестянки. Количество песка в одном мешке, оставшемся при мне в верхней части полета, я принимаю в 20 кг, хотя, вероятно, было менее 17 кг. Таким образом в сумме получается вес никак не больший, а вероятно меньший 400 кг. Этот вес должно отнять от веса воздуха, вытесненного аэростатом, для получения веса водорода, наполняющего аэростат. Аэростат вверху был совершенно раздут, следовательно его объем = 640 куб. м. Умножая 640 на 0.83, получаем вес вытесненного воздуха, равный 531 кг, следовательно водород в аэростате весил более 131 кг. Объем, занятый водородом, был теперь, т. е. на высшей точке поднятия, равен 640 куб. м, следовательно один куб. метр водорода весил 205 г, следовательно плотность водорода по отношению к воздуху была более 0.25, т. е. в аэростате содержался водород, имевший плотность лишь в 4 раза меньшую, чем воздух, вероятно же еще более тяжелый, т. е. смешанный с воздухом. Если допустим, что водород в том состоянии, в каком он выходил из прибора для добывания, имел плотность $^1/_{12}$, то нужна была подмесь примерно 1 части воздуха на $4^1/_2$ части водорода, чтобы получить в аэростате газ того удельного веса, какой он имел в действительности. Нет никакой возможности допустить, чтобы из приборов, служивших для добывания водорода, выделялся водород, содержащий такую громадную подмесь воздуха. Воздух, конечно, был в водороде, но ведь мы принимаем плотность водорода, выходящего из аппарата, ра-

ною $^1/_{12}$, а не $^1/_{14}$ противу воздуха, имея в виду некоторую обычную и неизбежную подмесь воздуха к водороду. Следовательно, воздух подмешался к водороду при наполнении и после него, и надо рассмотреть, какими условиями это вхождение воздуха в аэростат могло определиться. Мне кажется, что самое важное условие составляет при этом раннее наполнение аэростата водородом. Известно из прямых опытов, что, какова бы ни была ткань аэростата, во всяком случае она пропускает водород и воздух. В громадном привязном аэростате Жифара, действовавшем на всемирной выставке в Париже, было несколько (7) слоев ткани, не считая слоев лака, и, сверх того, поверхность аэростата, сравнительно с его емкостью, была мала. Несмотря на это, аэростат, все же, приходилось дополнять водородом и поддерживать его подъемную способность, т. е. даже при такой, на вид совсем непроницаемой, ткани водород все-таки выходит из аэростата и на место его входит в аэростат воздух. Известно из точных опытов, что в то время, когда через какое бы то ни было тонкое отверстие пройдет некоторая часть водорода, взойдет воздух, хотя и в меньшем объеме, чем объем вышедшего водорода. Наполнение аэростата в Клину начато было часов за 20 раньше срока, и за несколько часов до отправления добыча водорода была прекращена—недостало кислоты и железа. Если мы допустим, что шар был вполне раздут и наполнен водородом, то в течение нескольких часов все же успело взойти некоторое количество воздуха и выйти из аэростата гораздо большее количество водорода, т. е. газ аэростата обогатился воздухом. Однако, судя по тому, что шар в течение всего полета держался чрезвычайно хорошо в воздухе и сам не падал, пока я не выпустил газа из клапана, — надо думать, что в течение многих часов, может быть даже дней, он держал бы еще некоторую свою подъемную силу, а потому нельзя искать причину большой подмеси воздуха в одной выше указанной способности оболочки пропускать газы. По всей вероятности, были и другие обстоятельства. Замечу прежде всего, что приводящая водород тканевая труба часто запиралась. Водорода добыли много, но вероятно значительная часть его уходила в воздух, а не поступала в шар, иначе бы так не раздувалась проводящая труба, как я однажды видел сам. Раздутие этой трубы показывало большой перевес внутреннего давления в добывающих приборах. При большом же перевесе давления внутри добывающих и проводящих приборов все малейшие скважины этого сложного прибора должны были выделять огромную массу водорода. Если бы разложение было полным, то из 500 пуд. купоросного масла должно было бы получить по крайней мере 1500 куб. м водорода, и тогда бы шар, конечно, содержал очень мало воздуха, неизбежно остающегося в шаре при начале пополнения,

и подъемная сила аэростата была бы велика. Масса водорода должна была вымыть или вытеснить воздух. Надо думать, что в устройстве прибора и проводящей трубы были причины того, что главная масса водорода не вошла в аэростат. Если бы она входила, то был бы момент полного раздутия шара при наполнении, а его, судя по всем расспросам, не было вовсе. Ясно, что водород добывался, но в шар попадала и в нем оставалась только доля добытого. При таких обстоятельствах не только напрасно расходуются кислота и железо, но и являются условия для увеличения плотности газа, содержащегося в аэростате.

Вторым обстоятельством, служившим поводом для воздуха входить в шар, мне кажется, должно признать способ наполнения при том клапане, который был на аэростате. Клапан этот открывается изнутри кнаружи. Во время наполнения аэростат удерживался на земле рядом мешков, прицепленных к сетке; следовательно, внутри аэростата давление должно было быть несколько бо́льшим, чем атмосферное, и это отчасти могло содействовать открыванию клапана, особенно при давлении ветра на поверхность шара. Газ сдавливался, клапан отворялся. При сколько-нибудь, хоть незначительно открытом клапане и при том продолжительном времени наполнения, которое было в Клину, почти за сутки до отлета, могло через клапан выходить много водорода, и в то же время могло поступать внутрь аэростата много воздуха. Сверх этих причин могло случиться, что и при самом начале наполнения оставили в аэростате довольно значительное количество воздуха, т. е. недостаточно выжали воздуха из аэростата, тем более, что некоторое количество воздуха неизбежно остается уже в аэростате. Замечу еще, что веревка, проходящая внутри аэростата и служащая для отпирания клапана, как увидим далее, была запутана внутри аэростата. Петли этих запуток могли попасть под один из мешков с песком, удерживавших шар, и тогда при качании шара ветром клапан мог отворяться просто от натягивания веревки. Во всяком случае для меня несомненно, что главною причиною малой подъемной способности аэростата „Русский", наполнявшегося в Клину, служила большая относительная плотность газа, т. е. нечистота водорода и подмесь к нему воздуха. Из сказанного можно извлечь следующие советы, которых, мне кажется, следовало бы пока держаться при наполнении аэростатов водородом в условиях, подобных тем, которые были в нашем случае. Прежде всего наполнение водородом должно вести как можно быстрее. Чем короче время наполнения, тем больше уменьшаются все шансы вхождения воздуха и потери водорода, а для того, чтобы можно было быстро наполнять аэростат водородом, необходимо целесообразное устройство добывающих приборов. При этом лучше избегать тех обычных приемов, которые применяются

при наполнении аэростатов светильным газом, а именно: аэростат удерживают мешками с песком, прицепляемыми к сетке на различных параллельных кругах верхней половины аэростата. Аэростат, при быстром наполнении водородом, мне кажется, лучше всего держать руками за сеть или за оттяжки, которыми снабжен его экватор. Можно удерживать аэростат также при помощи особых пружин, определенное давление производящих и не позволяющих возрасти внутри аэростата давлению до такой меры, чтобы много газа выходило из нижнего отверстия, или из проводящей трубы, или из места ее скрепления с аэростатом. Далее, мне кажется, что клапаны, отворяющиеся кнаружи, должны быть вообще устраняемы, и укоренившийся обычай устройства клапанов, отворяющихся внутрь аэростатов, мне кажется во всех отношениях более целесообразным. Тот рукав, который отводит из добывающих приборов водород в аэростат, должно делать более жестким, чем обыкновенно это делают, чтобы не могло происходить случайного запирания отводящей трубы. Достаточно внутрь ее ввести спиральную проволоку или просто вставить картонную трубу, словом, принять самые простые меры для того, чтобы запирание отводящей трубы не могло происходить, так как при этом потери газа неизбежны. По моему мнению, вообще, главное внимание при организации военных аэростатов должно быть обращено именно на добычу водорода и на наполнение им аэростатов. Уверенность в выполнении аэростатических полетов в определенный момент может быть достигнута при легком, прочном, сравнительно малом и очень плотном аэростате только тогда, когда приготовление и наполнение водорода будут обдуманы во всех подробностях и испытаны при разных случайностях. Без этого и на войне может случиться то же, что в Клину: предполагается поднятие троих, а можно лететь одному, и то с малым количеством балласта, а тогда лететь далеко нельзя. Надо, чтобы этого не случилось больше никогда, и клинский подъем, я уверен, послужит к тому, что случай этого рода не повторится. Опыт всегда полезен и здесь его стоимость окупится тем, что увидят то, чего должно не делать, и подумают, как надо поступать, чтобы такой превосходный аэростат, как „Русский", даже в ненастную погоду поднимал хотя бы двоих при достаточном балласте. Здесь неуместно входить во все подробности тех улучшений, какие необходимы, но нельзя было избежать рассмотрения основных условий полета. Умалчивая о них, я бы не оправдал того доверия, с которым отнеслись ко мне не только те, которые устраивали и разрешали дело, но и самые его исполнители. Ведь без этого личного доверия — разве мог бы А. М. Кованько отпустить меня одного? Рассматривая с полною откровенностью возможные, по мнению моему, причины малой подъемной силы, оказавшейся

у нашего аэростата, я думаю, что выполняю свою истинную обязанность. Оттого так долго и подробно останавливался я над моментом отлета и над тем, что ему предшествовало. Описание происшедшего, будем надеяться, послужит на пользу предстоящему.

Переходя от этого отступления к рассказу, я должен, однако, объяснить, почему во мне моментально явилась решимость отправиться одному, когда оказалось, что нас двоих аэростат поднять не может. Главною причиною, конечно, служило то соображение, что, быть может, я и один в состоянии буду не только управиться с хозяйством аэростата, за которым мне не было повода смотреть до сих пор, но и успею увидеть и сделать наблюдение затмения. Оно приближалось, медлить было некогда, о мелочных подробностях дела разговаривать было не время и, хотя А. М. Кованько что-то такое мне стал говорить в этом отношении, но я почти не слышал. Помню только одно, что он мне советовал не отворять клапана до момента спуска. Признаться я и тогда хотел было ему сказать, что ходячие правила аэронавтики я знаю давно и не считаю их достаточно правильно выработанными, а потому лучше бы и не касаться этого. Затем мне мелькнула мысль о том, что приготовления все сделаны, об этом известно всюду, и если из всех этих приготовлений ничего не выйдет и даже шар не отлетит, то это произведет весьма нехорошее впечатление не только по отношению к моменту, но и на всю судьбу аэростатических восхождений у нас. Полезно было отправиться уже для того, чтобы показать, что аэростат не есть такое средство, которое требует продолжительной практики для владения им, что это есть способ передвижения, которым можно управлять с легкостью, даже и при полном отсутствии предварительного прямого опыта. Нужно, правда, знать главные условия аэростатики, и только при отсутствии этих сведений и благоразумного их применения, встречаются кое-где, хотя и редко, неблагополучные исходы воздушных путешествий. Править неизвестной лошадью, по мне, труднее, чем аэростатом. Немалую роль в моем решении играло также то соображение, что о нас, профессорах и вообще ученых, обыкновенно думают повсюду, что мы говорим, советуем, но практическим делом владеть не умеем, что и нам, как щедринским генералам, всегда нужен мужик, для того, чтобы делать дело, а иначе у нас все из рук валится. Мне хотелось демонстрировать, что это мнение, быть может, справедливое в каких-нибудь других отношениях, несправедливо в отношении к естествоиспытателям, которые свою жизнь проводят в лаборатории, на экскурсиях и вообще в исследованиях природы. Мы непременно должны уметь владеть практикой, и мне казалось, что это полезно демонстрировать так, чтобы всем стала когда-нибудь

известна правда, вместо предрассудка. Здесь же для этого представлялся отличный случай. Сверх всего этого, я должен признаться, меня соблазняла также мысль быть в первый раз на аэростате именно одному. Тут человек свободен и не стесняется присутствием другого лица. Что же касается до исхода полета, то я вполне был убежден в том, что сумею не хуже кого-нибудь другого найтись в могущих встретиться случайностях, и если бы они представили какую-нибудь опасность для одного, то во всяком случае опасность была бы еще в большей степени при нагрузке аэростата двумя пассажирами. Ни одного момента сомнения во мне не явилось. Все во мне поэтому требовало не медля отправиться одному, когда оказалось, что двоим отправиться нельзя. Но я совершенно отчетливо при этом сознавал, что в наблюдении затмения будут сделаны упущения, потому что самому придется делать то, что мог бы исполнить спутник. Все было соображено к тому, что полетим вдвоем и что во время подъема я успею приготовить приборы; а теперь мне прежде всего следовало думать и быть занятым техническими подробностями первых минут движения в воздухе. Оставались лишь немногие минуты до затмения, но их следовало употребить на случайные обязанности, к которым не готовился.

В кармане у меня был анероид графа Олсуфьева. Достал его в тот момент, как почувствовал, что веревки отпущены и аэростат начал подниматься. Мои глаза были устремлены на стрелку анероида. Не видел и не слышал, что происходило внизу. Стрелка анероида так медленно двигалась, что нужно было тотчас же бросить песок,—иначе шар мог опуститься обратно на землю и таким образом я опоздал бы к затмению. Осмотрелся кругом и нашел мешки с песком на дне корзинки. Мешков было два. Подняв один из них, я почувствовал, что в нем должно быть с небольшим разве пуд, а то и меньше, и тотчас же решил, что только один из мешков я употреблю для подъема; другой же оставлю для спуска, потому что для безопасности спуска очень важно сохранить запас балласта. При спуске могут встретиться препятствия в виде реки, болота, деревьев или зданий, которые нужно еще перелететь, а это возможно только при помощи сбрасывания балласта. Подняв мешок с песком, тотчас увидел, что его нет возможности скоро прицепить к краю корзинки, чтобы было удобно сыпать, и прижал его телом к стенке корзинки, а отверстие наклонил за борт для того, чтобы сыпать песок понемногу, как это следует для того, чтобы подъем не был чересчур быстр. Быстрый подъем может служить к тому, что газ аэростата, расширяясь, разорвет оболочку. Но песок не сыпался, потому что он образовал один сплошной комок, слипшись от воды в компактную массу. Пришлось поставить обратно на дно корзинки мешок с песком и черпать обеими

руками мокрый песок для того, чтобы выбрасывать его за борт. Когда выброшено было уже несколько пригоршней песку, большой анероид, висевший на веревках, поддерживающих корзинку, ясно показал, что подъем стал возрастать. Но все же кругом аэростата тогда был один туман или облако: с боков, вверху, внизу. Мне некогда было рассматривать и обсуждать. Стал еще усиленнее бросать песок, для того чтобы поскорее выбраться из этого облака в пространство, где бы можно было не упустить начала затмения, которое должно было скоро приблизиться, как я это чувствовал, хотя не имел ни времени, ни возможности посмотреть на часы. Когда главная масса песку была выброшена, тогда я взял весь мешок и выбросил его из корзинки с остатком песка. Шар стал, очевидно, быстро подниматься, но и относительная темнота стала наступать, так что я не знал: зависит ли это от того, что я нахожусь в очень густом облаке, или же — от начала полной фазы затмения. При этой последней мысли, я обратился тотчас же к обзору окружающих предметов, которые хотел бросить за борт для того, чтобы ускорить подъем. Первое, что мне бросилось в глаза, эта была электрическая лампа, привязанная к внутреннему краю корзинки. Принялся распутывать веревочки, которыми она была прикреплена, но узлы их не поддавались моим усилиям. Нож был у меня под руками, и я уже хотел резать веревки и ремни, прикрепляющие лампу с батареею, но остановился в виду двух соображений. Во-первых, аэростат и без того шел сравнительно скоро кверху, потому что давление уменьшалось, и я помню, что видел цифру, превышающую примерно высоту 500 м, когда еще я был в тумане. С другой стороны, у меня мелькнула мысль, что, быть может, шар улетел очень недалеко от города и толпы, и сбрасывание тяжелого предмета могло кого-нибудь поранить или в городе повредить крышу, а потому оставил мысль о выбрасывании батареи с лампой. В то время как глаза мои хотели искать других предметов, которые бы можно бросить за борт, шар вышел из облака и очутился в чистом пространстве. Полагаю, что это случилось на высоте не большей, чем 700 м, вероятно, даже, что около 600. Какая высота была в действительности, мне было некогда наблюдать, потому что первая мысль, которая теперь мелькнула у меня, состояла в том, что теперь не время думать ни о чем другом, кроме затмения, и надобно искать солнца, потому что его не было видно. Наверху, над чистым пространством, в котором теперь поднимался аэростат, плыли облака, и я думал, что облака закрыли солнце: но тогда у меня опять родилось желание бросить, что попало, за борт для того, чтобы пройти и верхние облака. Осмотрелся еще раз кругом и увидел солнце уже в полной фазе затемнения. Я теперь соображаю, на основании всех данных как личных, так и

собранных от многих лиц, бывших при моем отлете в Клину, что момент отлета был около 6 час. 38 мин. по среднему клинскому времени. Затмение же началось примерно в 6 час. 40 мин., следовательно около двух минут, а может быть и немного больше этого, употреблено было мною на то, чтобы пройти первый слой облаков и попасть в чистое пространство. В какой момент после начала полного затмения я увидал солнце, сказать точно нельзя, не только потому, что мне некогда было смотреть на часы, но и потому, что в заботе и хлопотах — скорее, чем во сне, — теряешь потребность знать время. Однако, судя по тому, что успело произойти после того, я думаю, что увидел солнце спустя лишь несколько секунд после наступления полной фазы затмения. Теперь обращаюсь к описанию того, что увидел по отношению к полному солнечному затмению.

Прежде всего нужно сказать, что темноты совсем не было. Были сумерки и притом сумерки ясные, не поздние, а так сказать ранние. Общее освещение облаков, виденное тогда мною, представляется совершенно подобным тому освещению, которое мне не раз приходилось видеть в горах после заката солнца, спустя, может быть, четверть или полчаса, там, где зари не видно и следа. Весь вид был свинцово-тяжелый, гнетущий. Думаю, что при бывшем освещении можно было бы еще читать, но я этого не пробовал, — не до того было. Увидев солнце с „короною", я, прежде всего, был поражен им и обратился к нему. Шар поднимался, и, как всегда бывает при подъеме и спуске, он вращался. Когда шар летит ровно, не опускаясь и не поднимаясь, он нередко плывет почти без следов вращения. Но когда он поднимается или опускается, вращение совершается постоянно. Верхняя и нижняя поверхности аэростата не представляют совершенных поверхностей вращения около вертикальной оси; где-нибудь есть уклон, меньший или больший к оси поднятия или спуска, и, кроме того, от действия ветра и поднимающей или опускающей силы движение происходит не по вертикальной, а по наклонной линии. Оттого получается давление на одно место передней поверхности иным, чем на другое, и является оттого неравномерность давления, которая заставляет шар при подъеме и спуске вращаться около вертикальной своей оси. От гибкости оболочки зависит то, что вращательное движение, начавшееся в одну сторону, не переменяется в другую, а ускоряется по мере возрастания быстроты спуска или подъема. Вращение шара чрезвычайно затруднило наблюдение. Нужно было, прежде всего, не упустить солнца и самому в корзинке поворачиваться, следя глазами за солнцем. Боялся упустить виденное. Около солнца невдалеке находились облака, и я не знал, надвинутся ли они на солнце, или солнце останется в той стороне, в которой не было облаков, т. е. будет мне видимо во всю фазу

полного затмения. Теперь я очень ясно соображаю, что увидел солнце примерно тогда, когда аэростат был на высоте менее одной версты, а после окончания полной фазы, однако, когда прошло уже несколько минут, я определил высоту, бóльшую двух верст; следовательно, во все время затмения аэростат поднимался, и это было причиною неудачи, далее встретившейся. Если бы со мною был аэронавт, я просил бы его выпустить газ и оставаться в той области, в которой солнце видимо. Теперь же мне следовало только смотреть на солнце, не имея никакой возможности и времени распоряжаться аэростатом.

То, что я видел, можно описать в очень немногих словах. Кругом солнца я увидел светлый ореол или светлое кольцо чистого серебристого цвета. Другого, более точного определения я не могу подобрать для оттенка, который я видел в „короне". Ни красноватого, ни фиолетового, ни желтого оттенка я не видел в „короне". Она вся была цвета одного и того же, но напряженность, интенсивность или яркость света уменьшалась от черного круга луны. Сила света была примерно как от луны. Размеры „короны", или ширина светлого кольца, виденного простыми глазами, были неодинаковы по разным радиусам, так что светлый наружный край был неровен и, следовательно, кольцеобразный светлый ореол представлял неодинаковую толщину в разных своих частях. В самом широком месте толщина кольца была не более радиуса луны. Никаких лучей, сияний или чего-нибудь подобного венчику, который иногда рисуют для изображения „короны", мои глаза не видели. Все, что я могу прибавить в этом отношении, состоит лишь в том, что напряженность света в разных частях кольца „короны" мне казалась неодинаковою, и ее наружный край стушевывался и представлял местами возвышения, местами углубления. Насколько успел заметить и припомнить, внизу мне видно было утолщение „короны" или бóльшая ее ширина сравнительно со всеми другими частями. Здесь внизу, если мои глаза не ошиблись, виден был красный оттенок, должно быть, выступов или протуберанций, которые характеризуют ближайшие части солнечной атмосферы и состоят из раскаленного водорода, извержение которого ныне есть уже возможность наблюдать и помимо полных солнечных затмений. Никаких звезд я не заметил. Никаких изменений однообразия или оттенков, никаких очертаний на оборотной стороне луны я также не заметил. Полагаю, что на этот обзор нового, но менее величественного, чем ждал, явления у меня пошло примерно 15 сек., во всяком случае не больше 20 и не менее 10 сек. Пораженный невиданною картиною, я желал, прежде всего, рассмотреть ту форму, которую так редко приходится видеть. Но следовало не медля приступить к измерениям. Прибор, для этого необходимый, был у меня уложен

в особую небольшую корзинку, запертую замочком, и мне пришлось наклониться, отпереть замок, открыть корзинку, вынуть минимальный термометр, лежавший сверху, привесить его к борту корзинки, вынуть еще другие термометры, которые также лежали сверху, и достать измерительный угломерный снаряд. Все это я делал, не отрывая глаз от солнца, ощупью,— для того, чтобы не потерять ни на один момент вид „короны", и я полагаю, что не менее 5 сек. пошло на это. Смотря на солнце, я с ужасом увидел, когда мои руки уже коснулись угломерного снаряда, что маленькое облако закрывает виденное. Собственно говоря, закрытие это происходило не от одного того, что облако набегало на солнце, но и от того, что мой аэростат поднимался и, следовательно, перемещался относительно верхнего облака и в моем новом положении облако встало между мною и солнцем. Сперва облако было редкое и туманное, так что сквозь него еще мелькала „корона", но скоро край большого массивного облака заслонил вполне солнце, и я тотчас увидал, что мне больше уже не увидать „короны" и, следовательно, наблюдать и мерять теперь было нечего. Как оно ни покажется странным, но я отчетливо сознал, что времени остается до конца затмения еще много, а потому на момент бросил глаза на барограф, и мне помнится, как будто я видел цифру около $1^1/_2$ версты поднятия по барографу, но уверенности в этом я не имею, а записывать и не думал, потому что, когда солнце заслонилось облаком, я решился не упускать из виду того места, где оно должно было находиться, для того чтобы, по крайней мере, видеть последний момент полной фазы. Это значит, что я продолжал поворачиваться, стоя в корзинке, и все мое внимание было обращено в ту сторону, где было солнце. известно, по показаниям многих наблюдателей, что тень луны, скользя по земле, представляется полосатою, тогда как другие наблюдатели об этом не упоминают. Казалось, что мне теперь с полным удобством, возможно будет решить этот вопрос. К сожалению, я тогда не догадался, я понял это потом, что мне лучше было бы смотреть для этого не в сторону солнца, а вниз, для того чтобы увидеть тень внизу. Там подо мною, в самом деле, в глубине стлались облака в виде ровной белой или, правильнее сказать, сероватой пелены, совершенно скрывшей землю, и на этой с виду однородной поверхности я бы мог, думаю, лучше видеть ход лунной тени. Тогда мне этого не пришло в голову, и я усиленно обращался в сторону, где было солнце. Облако было экраном и я думал на нем ясно приметить полосатость, если она есть. Мое внимание было вполне направленно именно на то, чтобы уловить момент первого освещения. Мои глаза были обращены к солнцу и направо от себя я увидел первые озолотившиеся края облаков. До того времени облака

представляли однородный серый цвет, хотя и представляли по краям сравнительно прозрачные, более тонкие места, но никаких оттенков на облаках не было видно. Теперь же облака озарились, как при закате или восходе солнца, и я видел край тени, скользящей по облакам, как по экрану, скрывающему от меня солнце. Полос в собственном смысле я не видал, но я видел, что тень скользит по облакам как бы скачками, или неравномерно двигаясь. Быть может, это и были полосы, но быть может, это есть только впечатление, зависящее от слоеватого сложения облаков, надо мною находившихся. Переход от сумерек к рассвету, теперь озарившему все пространство, был почти моментальный, сравнительно резкий, и когда тень проскользнула, наступила полная ясность облачного дня. Так как затмение должно было кончиться около 6 ч. 42 м., а моя первая заметка в записной книжке сделана в 6 ч. 55 м., то у меня оставалось более 10 мин., впечатления о которых теперь я совершенно забыл. Не помню, что я в течение их делал. Занята ли была мысль чем-либо, касающимся затмения, или она останавливалась на подробностях аэростата, я это совершенно утратил из памяти. Сознаю только тот момент, когда я счел нужным, прежде всего, записывать все, что далее со мною произойдет. Запись эта была нужна не только для того, чтобы укрепить то, что дальше увижу, в памяти, но и для того, чтобы воспользоваться числами тех наблюдений, которые сверх затмения мне хотелось сделать в продолжение полета.

Не подлежит сомнению, что все время, протекшее при затмении, а также и все время тех 10 минут, которых содержания я не помню, аэростат поднимался. Никакого ощущения, ни тогда, ни после того, от разрежения воздуха, от быстрой перемены в его плотности и температуре я совершенно не испытал, так что перемещение это не оставляло никакого ощущения в теле. Ветра, как известно, на аэростате обыкновенно нет, потому что сам аэростат несется вместе с массою воздуха и имеет скорость, равную с ветром. Он есть даже наилучшее средство для определения скорости ветра в том слое, где движется, а потому мне нельзя было узнать, несется ли мой шар в пространстве или поднимается в совершенно тихой атмосфере, т. е. вертикально над Клином. Конечно, если бы была видна земля, то можно бы сделать суждение, но подо мною была такая сплошная и общая, белая пелена облаков, что не было видно никакого клочка земли. Теперь и надо мною стало облако, хотя был виден край неба, где светило солнце, там сверху вовсе не было облаков. Облака были только в другой стороне, но я конечно не мог определить, несусь ли я сам от края верхнего облака под его массив, или облако надо мною движется, так что шар был сперва под краем облака, а теперь находится под его серединою. А в другой

стороне верхние облака сливались слоисто-кучевыми массами с облачным горизонтом, ниже меня проходившим, так что и края облаков в ту сторону вовсе не было видно. Двигался ли аэростат или шли облака, этого решить ни тогда нельзя было, ни теперь. Всего вероятнее, что двигались и шар, и облака, тогда разность направления и скорости определяла сравнительно быстрое перемещение аэростата под облаком, столь досадно закрывшим от меня конец полного солнечного затмения. Решивши вписывать те данные, которые замечу, я прекрепил веревочкою записную книжку к петле пальто; то же сделал и с карандашом, который также не следовало потерять, потому что другого не было. Должно быть ранее, в те 10 минут, сознание о содержании которых ушло из памяти, я вынул из кармана анероид графа Олсуфьева и сличил его с большим анероидом, висевшим на веревках аэростата. Чисел я не помню, но совершенно ясно помню, что согласие показаний было весьма удовлетворительным. Это дало мне убеждение в том, что анероид, висевший на аэростате и могущий показывать значительное уменьшение давления, согласен с тем карманным анероидом, который был у меня, и был сверен с ртутным барометром. В дальнейшем изложении я и пользуюсь показаниями большого анероида, так как малый анероид скоро прекратил свои показания, потому что его стрелка дошла до края шкалы.

Первая запись, как сказано выше, была сделана в 6 ч. 55 м. Тогда анероид показывал 525 мм, а минимальный термометр, на котором я прочел температуру, показывал —1.°2, что меня очень поразило, так как холода вовсе не ощущалось. Подумал, что этот минимальный термометр, заключащий в себе спирт, при перевозке каким-либо образом попортился, т. е. часть спирта ушла в верхнюю часть термометра. Удивился не только потому, что никакого ощущения холода не испытывал, но еще и потому, что выдыхаемый воздух не давал видимых паров. Так как со мною были еще другие термометры, то я повесил чувствительный термометр Гейслера и взял в руки вращающийся термометр или тромб Бодена, который после двукратного продолжительного вращения, в самом деле, показал ту же самую температуру. Эту температуру я записал, взглянул еще на гейслеровский термометр — температура была та же и, следовательно, уверенность в этой температуре у меня имеется совершенно полная. Так как затем я имел случай убедиться в том, что показания минимального термометра и термометра Гейслера отстают от показаний вращающегося термометра Бодена, то я все дальнейшие наблюдения делал исключительно при помощи этого последнего термометра. Отсутствие ощущения холода определяется тем, что не было никакого ветра, а когда нет ветра, тогда понижение температуры ниже 0°, при чистом воздухе, как

известно, очень мало чувствительно, если одет, как я, в довольно плотное драповое пальто. Знаю это из своих хождений летом по Альпам. Дыхания же не было видно, вероятно, потому, что воздух больших высот сравнительно сух. Глешер дает среднее содержание водяного пара при высоте $3^1/_2$ верст около $45^0/_0$, а потому выдыхаемые водные пары рассеивались тотчас, не сгущаясь в видимый пар. Кроме времени, давления и температуры, записаны следующие заметки: „Пахнет газом. Сверху облака. Ясно кругом (т. е. в уровне аэростата). Облако скрыло солнце. Уже три версты. Подожду самоопускания". Чтобы объяснить эти слова записи, достаточно сказать, что аэростат, поднимаясь, расправил свои складки, расширился, открыл нижнее отверстие и газ, все еще продолжая расширяться, не вместился в оболочке аэростата и, следовательно, должен был выходить. Запах водорода зависит только от того, что для его приготовления берется нечистое железо, в котором содержится некоторое количество сернистого железа, а оно дает при обработке серною кислотою сернистый водород, подмешивающийся к водороду, и запах этого сероводородного газа давал каждый раз знать о выделении газа из аэростата. Поднятие на три версты с выбрасыванием лишь одного мешка балласта, т. е. примерно лишь одного пуда груза, объясняется, главным образом, двумя обстоятельствами: во-первых, расширением оболочки аэростата, т. е. тем, что аэростат был на земле не вполне раздут, и во-вторых, высыханием оболочки и сетки аэростата. Смачивающая вода, конечно, должна была быстро испаряться в том чистом пространстве, в котором аэростат теперь находился. Из данных Глешера, Фламариона и других исследователей атмосферы, равно как из наблюдений на горах совершенно ясно вытекает, что нормальное состояние атмосферы определяет относительное увеличение влажности при подъеме до некоторой высоты, примерно до одной версты, а затем относительная влажность быстро падает. По Глешеру, если на земной поверхности средним числом будет около $60^0/_0$ влажности, то и при ясной погоде, на высоте около версты, будет 70 или даже немного более, а на высоте трех верст будет лишь около $50^0/_0$ влажности. При высоте 7 верст процент влажности еще втрое уменьшается. Кроче Спинелли показал, что при высоких поднятиях на аэростатах уже не видно тех земных спектральных линий, которые определяются присутствием в воздухе влажности. Другими словами, это значит, что верхние области атмосферы сравнительно сухи по отношению к возможному содержанию в них водяного пара, а так как температура верхних слоев все понижается, то весовое количество могущих содержаться там водяных паров мало, так что общее количество или масса водяного пара, могущая содержаться в верхних слоях атмосферы, ничтожно мала сравни-

тельно с тем количеством, которое содержится в воздухе земной поверхности. Поэтому аэростат, поднявшись выше одной версты, должен был высыхать, и аэростат „Русский", смоченный дождем прошлого дня, должен был значительно облегчиться в полосе, в которой он теперь находился. Если мы только допустим, что на аэростате было 3 или 4 пуда влаги, то это вполне достаточно для понимания высоты поднятия, которой достиг аэростат, так как он, потеряв влагу и часть балласта, еще увеличился в объеме. Приписка, касающаяся самоопускания, определяется тем соображением, что всякий аэростат, как бы он совершенен ни был, все же пропускает через себя сколько-нибудь газа, и для того чтобы держаться на данной высоте, аэронавту приходится выбрасывать некоторое количество балласта. У меня же не было в распоряжении балласта для выбрасывания, следовательно, я должен был думать, что самоопускание скоро наступит. Но оно в действительности не наступило даже через два часа времени, потому что за это время аэростат все еще сох и следовательно все сбавлял с себя груз без потери балласта, а так как это происходило само собою постепенно, то смоченный аэростат представляет отличное средство продержаться долгое время в верхних слоях атмосферы. Постоянно же выбрасывать балласт необходимо, если желательно оставаться в воздухе, потому что лишь только аэростат начнет сколько-нибудь опускаться, он уже будет сам собою падать до земли. Это происходит от того, что вверху аэростат и газ, в нем содержащийся, успеют охладиться и, попадая в низшие, более теплые слои, аэростат и газ не успеют нагреться, а потому сжимаются больше, чем было при подъеме, так как тогда газа содержалось больше в аэростате и температура газа была выше. Следовательно, раз начнется опускание, оно будет ускоряться и нужны постоянные жертвы балласта для того, чтобы держаться на определенной высоте. У меня в распоряжении балласта не было, и, следовательно, я мог рассчитывать на то, что самоопускание должно начаться скоро, тем больше, что часть газа все-таки теряется так или иначе, не только через нижнее отверстие аэростата, но и через всю его ткань. А ждать мне было необходимо уже потому, что внизу были облака. Спускаться чрез облака неудобно, потому что нельзя выбрать места опускания.

Попав в новую обстановку, я совершенно невольно отдался ее новым впечатлениям. Эти первые свежие впечатления от полета я совершенно ясно припоминаю, только описать не умею. Для того чтобы перенести читателя в эту обстановку, надо представить себя одного в полной и совершеннейшей тишине. Ничто не шелохнется. Кругом веревки, а за ними виден горизонт на том уровне, на котором находишься сам, а под ногами и наверху облака: нижние в виде сплошной пелены, а верхние—

в виде кучеватых слоистых и разнообразной формы скоплений. Те и другие облака находились на видимом горизонте, и, следовательно, общее впечатление состояло в том, что находишься в центре двояковыпуклой чечевицы, т. е. между двумя сводами, один обычный выпуклый, другой снизу вогнутый, как чаша. Ее поверхность белая, ровно матовая, а верхняя в разнообразных формах, подобных формам обычных облаков. Эти формы были так привлекательны и так к себе звали, что у меня опять родилась мысль подняться выше этих верхних облаков. Мне не с чем было выполнить эту мысль и пришлось отложить это до другого раза, когда придется отправиться с достаточным запасом балласта. Помню, что первое время я вовсе не думал ни о спуске, ни о хозяйстве на шаре. К практике аэростата мысли обратились лишь спустя некоторое время. Видно было, что шар все еще сохнет и поднимается. Запись, сделанная в 7 ч. 10—12 м., уже указывает на высоту в $3^1/_2$ версты и на давление 510 и 508 мм по анероиду. Показания барографа, укрепленного на аэростате, не содержат давления, а прямо дают высоты. Эти высоты немногим отличаются от истины, которая отвечает наблюденному и исправленному барометрическому давлению и записанной температуре, и только возвратившись на землю, я мог расчесть истинные высоты, на которых плыл в данное время аэростат. О перемене высот и температур я скажу после, описавши главную часть пути.

Но хотя обстановка и была новая, хотя окружающее и занимало своею картиной, тем не менее мысль невольно перешла к земле, к тем, кого там оставил, и это заставило позаботиться о предстоящем спуске на землю и осмотреть принадлежности аэростата, назначенные для этой цели. В обычных аэростатах есть четыре приспособления для спуска. Спуск, как сказано, совершается сам собою, лишь только шар начинает опускаться. Следовательно, если не выбрасывать балласт, шар, начавши медленно опускаться, опустится сам и опустится с возрастающею скоростью, пока не дойдет до той предельной скорости, которая отвечает его сопротивлению в воздухе. Средство нарочно заставить начаться спуску очень просто. Стоит выпустить небольшое количество газа, спуск начнется, и, если быть в этом отношении умеренным, спуск начнется медленно, и, имея запас балласта, легко заставить шар спускаться со всею желаемою осторожностью. Но для самого спуска на землю надобно иметь самостоятельные средства. Аэростат совершенно безопасен даже при очень быстром движении в воздухе. В воздухе ему одна только опасность — разрыв оболочки при перевесе давления внутреннего газа. При спуске этого не бывает, потому что давление внешнее атмосферное ежесекундно возрастает и мягкий шар вдавливается, сжимается, следовательно разрыва при этом быть не может. Сред-

ства для спуска аэростата на землю однако нужны, как и в кораблях, при приближении к земле. Без надлежащих средств спуск может произойти с большою быстротою, что даст удары корзинки об землю. Ударившись, корзинка облегчит аэростат. Аэростат привскочит, опять ударится, и это может продолжаться очень долго, если не иметь надлежащих средств для того, чтобы прекратить эту игру ветра и газа, наполняющего шар. Четыре средства для безопасности спуска состоят: 1) из клапана, находящегося в зените или в верхней точке аэростата и открываемого веревкою, идущей оттуда внутри шара в корзинку воздухоплавателя; 2) затем из запаса остающегося балласта, 3) далее из особой опускной веревки, изобретенной Грином и называемой французами гидропом, а англичанами — гайдропом, как и следовало бы называть ее, 4) наконец, для спуска есть четвертое средство—якорь, прикрепленный на прочной веревке. Клапан выпускает газ и, следовательно, лишает шар относительной легкости, заставляющей его всплывать и подскакивать при спуске. Балласт доставляет возможность перескакивать некоторые препятствия, например реки, деревья, дома. Гидроп представляет длинную опускную веревку, касающуюся земли раньше шара и тогда его облегчающую, следовательно, смягчающую удар и могущую даже его совсем уничтожить. Якорь назначается для того, чтобы препятствовать ветру тащить аэростат в одинаковом с ним направлении по земле. Соответствие всех этих четырех средств и правильное распоряжение ими составляют условия безопасности спуска. При правильном пользовании, даже и в довольно сильный ветер, можно спускаться безопасно, как показывают многократные случаи. При отправлении из Клина ветер был очень слаб и можно было думать, что в этом отношении спуск будет благоприятен, так как не видно было условий развития сильного ветра в среде, в которой находился шар. Следовательно, надо было осмотреть три других средства, кроме балласта, которого количество мне очень ясно было с самого начала. Взглянув за борт корзинки, где должны висеть бухты свернутых канатов — якоря и гидропа, я к моему удивлению увидел, что оба каната уж спущены на землю. Помимо меня их кто-то отвязал. Это составляет явную ошибку. Нельзя объяснять ее тем, что кто-то позаботился о моей участи и о том, чтобы сделать мой спуск безопасным. Напротив того, весьма опасно спускать прямо на землю канаты якорный и гидроп, потому что вначале шар со слабой подъемной силой мог просто зацепиться отпущенными канатами за какое-нибудь препятствие и тогда бы родилось действительное неудобство быть прикрепленным к земле, не имея, быть может, иного средства освободиться от привязи, как лишившись средства, назначенного для спуска. Лица, окружавшие меня при спуске шара, очень хорошо

помнят и даже корреспондент какой-то газеты записал мое требование ножа в момент отправления. Должны были понять, что этот нож я требую для того, чтобы своевременно успеть отрезать веревки, прикрепляющие бухты канатов к краю корзинки. Особенно же неприятно подействовало на меня то, что оба каната были не распутаны, а запутаны при спуске. Оно и должно так быть почти всегда, когда канаты обрезывают на земле. Словом, никому и никогда нельзя советовать делать подобную операцию при отправлении аэростата. Конечно, нужно сообразить способ обрезывания канатов, для того чтобы при спуске канатов с аэростата не произошло запутки. Но с аэростата возможно так распорядиться делом, чтобы канаты не были запутаны, а когда канаты спускают на землю, тогда запутки почти неизбежны, ни один канат не будет в исправности, и во время полета придется работать с распутыванием, как это и пришлось мне. Увидевши запутки обоих канатов, я тотчас решил, что распутаю сначала гидроп как одно из главных средств безопасного опускания на землю. Каната же от якоря я решил вовсе не распутывать и даже, если будет возможно, и вовсе не применять при спуске. Это последнее решение определялось, во-первых, тем, что при отлете ветер был слаб, во-вторых, тем, что опускание якоря при приближении к земле может служить даже стесняющим обстоятельством для окружающих лиц, которые прибегут помочь спуску аэростата. Решил поэтому так: если увижу, что будет достаточно народа при спуске, а ветер будет не очень силен, — о силе же ветра можно судить по деревьям и окружающим предметам, например просто по платку первой бегущей женщины, — тогда я якоря не спущу. Если же ветер начнет тащить по земле аэростат, тогда я еще успею обрезать те веревки, которые удерживают самый якорь у корзинки, и при этом будет почти безразлично, запутана или не запутана веревка, идущая от каната; все равно, если она и затянется где-нибудь узлом, это не имеет никакого значения, узлы и запутки якорного каната могли его укоротить, но длина будет несущественна, так как я решился употребить якорь только тогда, когда уже коснусь земли и увижу особую надобность в его применении. Если бы опускание было очень быстрым и опасность была бы от удара, тогда бы должно было спустить якорь еще в воздухе, потому что он бы играл роль гидропа, но я был убежден, уж не знаю почему и как, что сумею спуститься полегоньку, не дам аэростату падать, потому вероятно, что условия ускоренного падения мне рисовались совершенно ясно и я их предупредить предполагал. Быть может, здесь играли немалую роль те многочисленные наблюдения над скоростью падения тел в воде и в других жидкостях, которыми я занимался однажды. Так или иначе, а я решил — якорного каната не распутывать

и якорь применять лишь в крайности. Иное дело по отношению к гидропу. Запутанный гидроп становится коротким, а гидроп особенно важное значение имеет именно вследствие своей длины. Его делают в несколько десятков сажен и довольно значительного веса именно для того, чтобы когда он коснется земли, он убавил бы вес аэростата и заставил бы его подниматься. Гидроп следовало распутать. Поэтому я втащил гидроп в корзинку аэростата до первой запутки. Их было всего, кажется, три или четыре на всей длине каната и первая была на расстоянии может быть сажен пяти или шести. Канат оказался тяжелым или мне это так казалось, но во всяком случае труд не легкий — поднимать канат через край корзинки, в особенности тогда, когда дошло дело до перекидывания запутки. Мне теперь говорят, что в гидропе всего пуд с небольшим, но я думаю, что вес его больше, может быть потому, что и он был намочен, как и весь аэростат. Вытащив первую запутку, я ее разобрал и уложил канат в корзинку, так, чтобы можно было, не боясь перепутывания, сразу пустить за борт гидроп. Рассчитывал на то, что при быстром падении тяжелой веревки остальные запутки сами собою от встряхивания распутаются. Но этого, к сожалению, не произошло и потому мне затем пришлось опять весь гидроп втаскивать в корзинку. Но так как работа с канатом мне непривычна, то я и захотел несколько отдохнуть, прежде чем вновь приняться за нее. При этом я обратился к веревке клапана, чтоб посмотреть, находится ли она в порядке. Поводом к этому послужил новый запах газа. Газ, очевидно, стал выходить теперь от того, что шар поднимался еще выше и терял еще часть газа. Мне хотелось испытать с возможною осторожностью действие клапана. То, что я увидел при этом, поразило меня в первый момент гораздо резче и больше, чем все предшествовавшие обстоятельства.

Веревка клапана проходит в нашем аэростате не в обычное широкое нижнее отверстие, теперь совершенно открытое и бывшее закрытым на земле, а она проходит через особое узкое отверстие, находящееся вблизи нижнего широкого отверстия аэростата. Такой способ применяется редко и его нельзя одобрить. Тот случай, который был при моем полете, отлично это доказывает. Гораздо проще, лучше и во всех отношениях надежнее прямо пропускать веревку клапана через широкое нижнее отверстие аэростата. Тогда всякая внутри запутка этой веревки не имеет никакого значения. Теперь же я увидел, что на веревке, идущей от клапана внутри шара, имеются две запутки и одна из них, именно верхняя, снабжена большою петлею, опускающеюся внутри шара и почти достигающею нижнего отверстия аэростата. Другая же запутка была вблизи отверстия и составляла более сложную систему заверток и петель. Нижний конец веревки был привязан к веревке или к кольцу аэростата. Потянув к себе

веревку клапана, я тотчас почувствовал, что она, проскользнув несколько в отверстии, задержалась первою запуткою. Очевидно, что в то время, когда до подъема А. М. Кованько, на мой вопрос об исправности клапана, попробовал тянуть его веревку, — произошло то же, он почувствовал задержку и ответил мне, что клапан в исправности. В действительности он ощутил не сопротивление от пружины клапана, а сопротивление от пружины запутки, бывшей на веревке и не проходившей в узкое отверстие. Отворять клапан, конечно, на земле не следовало и А. М. Кованько тянул для того, чтобы отворить клапан, а тянул только до тех пор, пока встретил препятствие.

Итак клапаном нельзя было действовать и нужно было что-нибудь предпринять для того, чтобы это средство спуска привести в надлежащий порядок. Теперь, когда я сижу дома и спокойно обдумываю это дело, мне очевидно, особенно после слов моего сына, что я мог совсем иначе действовать, чем я действовал. Можно было просто-напросто заставить длинную петлю, почти висевшую из широкого отверстия, сколько-нибудь опуститься и как-нибудь и чем-нибудь ее достать. Тогда я имел бы один конец веревки и мог бы чрез широкое отверстие прямо распоряжаться клапаном. Тогда мне эта мысль не пришла в голову, равно как и другая, на которую мне в последнее время указал А. М. Кованько. Можно было просто разорвать ткань аэростата сильным ударом веревки. И эта мысль не пришла мне в голову, но если бы она пришла, то, может быть, я бы к ней прибегнул, а все же попробовал бы сперва те средства, которые я применил. Весьма вероятно, что, если бы эти средства не удались, я придумал бы одно из вышеуказанных средств или еще какое-либо, но первая мелькнувшая мне мысль поправить дело — основывалась на свойствах веревки. Взяв веревку клапана в руки, я почувствовал, что она сделана превосходно — плотная, гибкая, крепкая, упругая, хотя и тонкая. Ощущение от этой веревки и теперь еще осталось у меня. Мне сказали потом, что клапанная веревка на аэростате „Русский" сделана из шелка. Ощущение отличного качества веревки дало мне тотчас мысль воспользоваться этими качествами и сильным встряхиванием постараться распутать узлы, на ней имеющиеся. Уместился поудобнее в корзинке и, не отвязывая конца веревки, стал ее сильно встряхивать. Эти встряхивания вели к тому, что вся веревка вплоть до клапана подверглась волнообразному сотрясению, и я с радостью увидал, что от этих встряхиваний первая запутка стала вывешиваться в широкое отверстие аэростата и скоро на ней петли стали уменьшаться, так что, может быть через десяток встряхиваний, я достиг того, что первая запутка совершенно распуталась. Это меня конечно ободрило, и я усердно принялся продолжать тот же маневр, заметив, что нельзя дей-

ствовать клапаном и после распутки первых узлов. Однако теперь я боялся затянуть петлю, висевшую внутри аэростата, потому что мне казалось, может быть и без достаточного основания, что если я ее затяну, то узел переползет, затянется и попрепятствует действовать клапаном. Как сильно я ни встряхивал теперь вновь веревку клапана, ее узел не распутывался. Тогда, видя надобность закончить это дело так или иначе, я, не долго размышляя, решился разрезать ножом ткань аэростата от веревки до главного отверстия и для этого полез вверх, хватаясь за веревки и за кольцо. Мне хотелось достичь до отверстия, чрез которое пропущена клапанная веревка. Захватил с собою в кармане нож, а под пуговицу пальто пристегнул петлю от клапанной веревки. Первые движения показали мне, что всякое давление на край корзины или кольца изменяет положение центра тяжести аэростата и дает корзине наклонное положение, после чего происходит раскачивание, препятствующее удобству влезания. Увидав это, я попробовал, могу ли без головокружения оставаться в висячем положении на воздухе. Для этой цели, приподнявшись из корзинки, я стал глядеть прямо вниз, направив корзинку давлением и своим отклонением в сторону так, чтобы она была сбоку. Пробыв в таком положении некоторое время, я увидел, что никакого головокружения у меня нет. Бродя прежде по Альпам, я знал это, но думал, что с течением времени и в особых условиях у меня не сохранилось это свойство. Признаюсь, однако, что был момент, когда я подумал, что мне не следует предпринимать непривычного лазанья по нестойким опорам, но это была такая мимолетная мысль, что сознание необходимости привести в исправность клапан тотчас же прогнало эту мысль. За что-то цепляясь руками и ногами, я стал влезать выше и, когда уже приподнялся, быть может, аршина на полтора, то почувствовал, что очутился в положении сравнительно устойчивом, и увидел, что остается еще труднейшая доля пути, чтобы добраться до отверстия, чрез которое продета веревка клапана. В таком положении, в котором я в этот момент находился, а именно с того боку, с которого было отверстие, проводящее клапанную веревку, мне показалось возможным еще раз испытать встряхивание веревки. Веревка при тех маневрах, которые я делал, несколько закрутилась и я почувствовал, что она стала от этого жестче. Тогда я этим воспользовался, стал крутить и в то же время встряхивать и к великой радости увидел, что этот маневр служит к тому, что узел распутывается. Так как от встряхиваний происходило колебание, то временами мне была видна веревка внутри шара, и я попытался, повторяя прием, достигнуть полного распутывания без дальнейшего влезания. Так это и случилось. После пяти-шести кручений и встряхиваний узел

веревки распутался. Мне ныне многие говорят, что, быть может, я и не в состоянии бы был произвести предположенную мною операцию разрезывания оболочки шара от отверстия, проводящего веревку шара до главного нижнего отверстия аэростата, потому что при этом я должен был бы наклонить весь аэростат вбок и отверстие ушло бы от меня далеко. Не знаю, что произошло бы, если бы мне пришлось лезть дальше, т. е. вскарабкаться еще выше на те, может быть, два аршина, через которые мне можно было бы уже достать рукою отверстие шара, но я видел, что мне остается сравнительно немного для достижения цели. Оставшаяся часть пути, конечно, не была так удобна, как предшествующая, и я, прежде чем приступить к ней, достиг желаемого, а потому не могу сказать, что бы я предпринял, если бы мои попытки произвести разрезывание оболочки шара оказались безуспешными. Быть может, и в самом деле шар ушел бы от меня так далеко, что я не в состоянии был бы достать отверстия. Но мне кажется и теперь, когда я вижу другие средства поправить беду, что у меня в руках было средство для того, чтобы не удалиться от цели. Это средство было в виде самой веревки клапана, которая была прицеплена ко мне и которая могла служить до некоторой степени опорою, посредством которой я притянул бы к себе в желаемой степени оболочку шара. Однако, нечего говорить о том, что не произошло, но я живо помню, что действовал тогда не очертя голову, а в полном самосознании, которое указало бы мне, вероятно, невозможность, если бы она стала очевидною. При том положении, в котором я был, и в те моменты мне еще не представлялось предположенное разрезывание невозможным, мне только казалось мало удобным карабкаться дальше, и я попробовал другой прием. Если бы он не удался, я, конечно бы, стал взбираться выше и разумеется, что прекратил бы попытку, если бы она привела к невозможности, т. е. спустился бы и стал бы обдумывать другие средства. Удача случилась ранее, чем ждал, но, быть может, что без подъема кверху кручение и встряхивание не привели бы к цели. Во всяком случае дело устроилось благодаря лишь превосходным свойствам веревки. Вообще вся материальная часть аэростата „Русский" достойна больших похвал, видно, что сооружали дело знатоки и что средств не жалели. На таком аэростате летать можно.

Когда спустился в корзину — ощущение было очень приятное, удовлетворенное. До такой степени обрадовался распутке этой веревки, что невольно захотелось попробовать и действие клапана. Но я знал, что выпускать много газа нельзя — шар начнет падать, немного же выпустить было безопасно, потому что газ расширялся, им пахло, и я только чуть-чуть на один момент приотворил клапан, чтобы увидеть, какое давление руки

для этого необходимо. Затем, внутри корзинки оказался большой конец клапанной веревки, бывшей в виде петель и запуток внутри аэростата. Мне пришлось раза три или четыре делать бухты для того, чтобы прикрепить освобожденную часть веревки, и я думаю, что не менее двух, а может быть, даже и четырех сажен этой веревки теперь оказалось лишних противу того, что было до распутывания. Таким образом клапан оказался вполне в моем распоряжении. Не медля же я приступил к окончательному исправлению запуток гидропа. Весь гидроп до конца, потому что на самом конце также была запутка, я втащил в корзину. Бухты гидропа заняли все ее пространство. Было трудно разбираться с узлами этого тяжелого каната, но и это дело было кончено, и я осторожно спустил весь канат за борт. Тогда только почувствовал, что устал от физического труда, и решился сесть и отдохнуть. Сиденьем мог служить только оставшийся мешок песку. На него уселся и сильно обрадовался, увидев булку и бутылочку с чаем, еще теперь чуть теплым. Мои друзья положили мне это в корзинку, так что я даже не заметил при отлете. Сколько времени просидел, выпив чаю, не заметил, тем более, что теперь обдумывал положение дела, особенно спуск. Совершенно ясно сознавал, что при исправности всех орудий для спуска, несмотря на малость балласта, мне можно будет спуститься осторожно, если не пропущу надлежащего момента. Начинать спуск теперь же было невыгодно, подо мной были облака и чрез них нельзя выбрать удобного места, а спустившись низко, мне не с чем удержаться там — балласта мало. Затягивать спуск также не следовало, потому что высыхание аэростата заменяло выбрасывание балласта, но это высыхание должно было скоро кончиться и тогда начнется самоопускание, а с ним мне справляться также нечем. В первые моменты после затмения я решил ждать самоопускания, даже в записной книжке это решение внесено, а теперь, вновь все обсудив, получил прямо противоположное решение. Думаю, что последнее было вернее и результаты его оправдали. Есть много выгод лететь одному, никто не мешает подумать еще и еще, решить и перерешить, действия лишаются признаков случайности и некого упрекнуть в чем-либо. Мне тогда это самое представилось, и я передам здесь ряд мыслей, который мелькнул у меня в моменты отдыха, сидя на дне глубокой корзины, откуда ничего окружающего не видно, только сбоку и снизу камышевые прутья, да сверху веревки и внутренность шара до клапана. Мне хотелось самому все мелочи сильного большого аэростата так надежно устроить, чтобы о них не думать при полете. В запасе надо иметь много, много балласта. Взять с собой такие самопишущие приборы, которые бы все, что хотелось бы наблюдать и узнать, сами бы записали: время, давление, температуру, влажность,

плотность газа и окружающего воздуха, облачность, скорость движения и его направление. Пришлось бы только по временам делать, так сказать, проверочные наблюдения, да распоряжаться ходом шара. Заставил бы его подниматься понемногу до таких высот, где еще возможно безопасно оставаться, или лететь так далеко и долго, как возможно, и, быть может, этим путем скоро бы решилась одна из задач науки об атмосфере, достиглось бы понимание той среды, которой все живут и которую классики нисколько не понимали. Ею и теперь еще не владеют, потому что ее значение не понимают, ее боятся, и напрасно, на ее изучение средств жалеют, хотя их жертвуют на исследование перемен, совершающихся на дне воздушного океана. Всякие подробности промелькнули в уме, вспомнилось многое, что когда-то обдумывал и должен был оставить, затушевать другим. Прошли немногие минуты, а в них уместилось внутри многое, ведь ничто не развлекало, не задерживало, среда была открытая, вольная и никто не мешал. И назойливые вопросы проходили: отчего науки не имеют достаточных средств для выполнения своих мирных целей? Отчего даже в мирное время все средства имеются для войны? Отчего не достает их хотя бы на то и на другое? Отчего для затмения, для случайного и далекого, для мелкого и частного все находим, а для постоянного, неизбежного, высокого и в то же время близкого — не достает? Мелькали и ответы, а в них выступали опять неотвязчивые классики и настоятельная необходимость терпеливо искать верного пути, да верить в то, что, несмотря на всю силу классических предрассудков, защищаемых коалициею спокойных ретроградов и беспокойных новаторов, наука все-таки мирно пробивает и пробьет свою дорогу к истине и пользе.

И ясно помню, что эти-то ответы заставили вновь обратить мысль к спуску, вспомнить действительность ближе и в результате явилось одно — не то желание, не то решение — спуститься как можно правильнее во всех отношениях для того, чтобы стало ясным, что практическое управление аэростатом может быть, при известной подготовке к опытному изучению природы, делом достижимым даже для новичка, если все приведено в должный порядок и надлежащее присутствие духа будет сохранено в момент спуска, как оно сохранилось до сих пор. Того, что делалось наверху, в одиночестве, никто не видел, проверять могут только самопишущие снаряды, а их всего один — барограф, явятся, конечно, и свои Фомы-неверные, а то, что произойдет при спуске, видно станет и в результате окажется. Мне, новичку, следует спуститься благополучно во всех отношениях, сохранить не только себя, не только аэростат спустить целым, а не в клочках, как бывает нередко, но и всякие приборы сохранить. Если это сделается, все же страх полететь по воздуху

будет пропадать, и когда-нибудь да догадаются, что в воздушном океане наблюдать можно, пожалуй, покойнее, чем в Тихом океане. Такими мыслями была полна голова, и они заставили с полнейшею внимательностью отнестись ко всем мелочам спуска. Полагаю, что его хороший исход зависел именно от настроения, бывшего во мне при отдыхе. Мне захотелось демонстрировать в данном случае легкость владения аэростатом.

Сколько времени отдыхал и думал — не знаю, а встал укрепленный и уверенный.

Помню очень хорошо, что после отдыха я увидел, что надо мною еще были облака и подо мною земли еще не было видно, т. е. что окружающая обстановка изменилась за это время сравнительно чрезвычайно мало. Стоял ли я на месте или передвигался скоро или медленно—это мне невозможно было знать, хотя я видел движение верхних облаков по тому, что светлый край неба, вначале бывший над моей головою, теперь был уж очень далек на горизонте. Но можно было думать, что движение определяется перемещением самих облаков или относительным в то же время моим передвижением. Никаких средств для определения направления и скорости полета в подобных условиях у аэронавта нет. Он тогда совершенно должен отдаться окружающим условиям, и я, со своей стороны, решился лететь до тех пор, пока не покажется земля. Такое решение особенно сознательно уложилось в голове, потому что без выбрасывания балласта я все еще поднимался и, следовательно, это могло зависеть только от высыхания шара и от увеличения температуры газа внутри шара. Шар же, очевидно, если пропускает газ, то в очень малом количестве; следовательно, с ним можно долго оставаться в воздухе. Оставленные мною на земле лица, присутствовавшие при отлете, неоднократно мне говорили, чтобы я спускался, по крайней мере, поскорее. Меня к этому же звало и то вполне понятное беспокойство, которое должна была ощущать по отношению ко мне моя семья, оставленная столь неожиданно и, конечно, долженствующая бояться именно того, что я полетел один, тогда как предполагалось лететь двоим. Но вместе с тем я знал, что спуск через облако не может быть никогда столь удобным, как спуск на землю, совершенно открытую, а потому ради уже благополучия спуска или ради хорошего конца удачно идущего плавания мне хотелось именно дождаться того момента, когда аэростат выплывет на пространство, лишенное облаков внизу. Рассчитывал при этом на то, что открывшееся после затмения солнце должно рассеять или заставить подняться вверх нижние облака. Раз даже у меня мелькнула мысль о том, чтобы воспользоваться отличными свойствами аэростата для того, чтобы испытать продолжительное плавание, и, не будь мой отлет столь неожиданным, я плавал бы до тех пор, пока только было бы возможно, с аэро-

статом, имевшимся в моем распоряжении. Во всяком случае теперь хозяйничать было не с чем и я решился приняться за наблюдения, которые мог делать, особенно же температуры и окружающих предметов. Кроме того, мне хотелось так или иначе постараться определить направление своего перемещения. В это время, а именно, судя по записной книжке, в 7 ч. 20 м., далеко на горизонте показался под облаками край земли, но еще неясный. Как мореплаватель, увидевший землю, так и воздухоплаватель, конечно, всегда обрадуется, увидевши ее в первый раз. Земля была, однако, еще очень далеко на горизонте. Подо мной висел еще туман, но скоро оказалось, что этот туман рассеивается и ясно виден конец облаков, за которыми следовала земля. Облака, казалось с этой высоты, совершенно лежат на земле. Первая запись, в которой упоминается о том, что ясно видна земля, относится к 7 ч. 23 м., когда стало теплее и анероид показывал 505 мм давления. Тогда показались и лучи на облаках. Я долго не мог понять той записи, которую встретил у себя в книжке. Пишу, что „иду от земли". Это, очевидно, впечатление, которое бы записал моряк, если б ему показалось, что он удаляется от берегов. Вдали видная полоса земли казалась на одном со мною уровне, и я записал, что иду от нее. Но это было только впечатление кажущееся, вероятно не чуждое страха долго оставаться под облаками. Скоро оказалось обратное, земля делалась виднее и вместо узкой полосы стал виден подо мною уже большой отрезок земли. Произошло ли это от перемены направления моего движения, или от того, что изменилось направление в движении нижних облаков, или, может быть, даже просто часть облаков рассеялась, — только стало очевидным затем, что я приближаюсь к земле, т. е. что все бóльшую и бóльшую часть видимого снизу занимает земля. На ней показались две реки. Записал, что должно быть это реки тех мест, которые мне хорошо известны: Сестра и Лутосня. Но они были далеко и справа затянуты как бы туманом. Лишь мало-помалу они стали виднее, и в $7^1/_2$ ч. я записал, что „ухожу от реки", следовательно, иду на юго-запад. При этом в записной книжке я зачертил форму главной реки и впадающей в нее меньшей реки. Они образовали между собою сравнительно острый угол. Подробностей тогда еще никоим образом нельзя было видеть и только по открывшейся земле удалось определить с компасом в руках направление движения. Это заняло довольно много времени, и с этого момента я уже не выпускал компаса для того, чтобы, хоть сколько-нибудь, судить о направлении своего полета. Но простой компас, который был у меня в руках, при том вращении аэростата, которое теперь опять началось, дает очень плохое средство для правильного определения направления. Обдумывая предмет, я там же на аэростате составил себе план такого при-

бора, который мог бы служить аэронавтам для удобного определения направления своего движения. Когда-нибудь я осуществлю устройство такого прибора. Вынув карту, я скоро убедился, что ошибся в первоначальном определении рек, места были незнакомые, а затем вскоре разъяснилось немного более и стало уже очевидно, что главная река довольно значительна и впадающая в нее река также довольно широкая, а потому я был убежден уже, что это есть Волга с одною из рек, в нее впадающих. Долго думал, что это есть Шоша, впадающая в Волгу в Клинском уезде, но затем оказалось, что это Дубна, впадающая в Волгу уже в Тверской губернии. В 7 ч. 34 м. в моей книжке находится запись о том, что гладкая поверхность внизу лежащих облаков переменила вид. Облака стали как бы рябыми и сквозь них начала проглядывать земля. Немного позднее все еще надо мною и подо мною были облака. Только в 7 ч. 45 м. уже на шар упали лучи солнца, и шар поднялся еще выше, так что давление стало 495 мм. После этой записи все остальные ясно свидетельствуют, что я приближался к главной реке, которая видна, т. е. к Волге, и направление движения аэростата становится северо-восточным. Комбинируя теперь сделанные записи, я прихожу к заключению о том, что под облаками аэростат плыл немножко ниже и несся в другом направлении, чем после того, как вышел из-под облаков. Смотря теперь на карту, которой тогда у меня не было, я думаю, хотя уверенности в этом не имею, что первоначальное направление моего пути было северо-западное, потом направление изменилось в юго-восточное, и уже под самый конец оно стало северо-восточным, пред спуском же вниз почти северным. Должно быть, что мой путь по воздуху, вообще говоря, представляет не прямую линию, а очень изломанную в первой половине пути. Только около 8 ч., когда была достигнута высшая точка поднятия и солнце уже светило, а облаков под аэростатом не было, направление пути определилось несомненно к северо-востоку.

Здесь считаю полезным указать на одно обстоятельство, поразившее во время путешествия: когда я вышел из-под верхних облаков, подо мною также уже не было облаков, т. е. края верхних облаков и края нижних были почти на одной вертикальной линии. Отойдя от облаков, может быть верст на пять, я видел с аэростата, что плыл почти в середине между верхними и нижними облаками. Те и другие сходились: одни снизу, другие сверху на горизонте, и было ясно, что очертание облачных областей одинаково вверху и внизу. Многое заставляет думать, что это не исключительное явление, и в описаниях воздушных путешествий встречаются случаи нескольких этажей облаков, лежащих друг над другом, а рядом тянутся пространства или проходят как бы отверстия или прогалины, где вовсе нет облаков.

Подъем аэростата около 8 часов до высшей точки определился, очевидно, действием солнечных лучей. Аэростат высох еще больше и его газ разогрелся, но и тогда, заметив это поднятие от нагревания, я не мог приметить самоопускания аэростата, и так как запах газа был довольно силен, то я опять чуть-чуть приотворил клапан. Звук, раздающийся при выхождении газа, столь отчетливо слышен, что дает возможность узнавать, как продолжительно было открывание. Замечу еще, что во все время моего путешествия в аэростате газ был совершенно прозрачен, а известно, что он нередко бывает туманный при восхождении в верхние области. Это показывает, что при приготовлении газа осушительный снаряд действовал довольно исправно.

Когда подо мною оказалась земля и надо мною стало светать солнце, уже совершенно открытое как от облаков, так и от заграждения луною, тогда вид земли привлек все внимание. Местность, над которой пролетал аэростат, довольно населена, хоть в ней встречаются леса и видны местами болота. Пашни представляются как разноцветные полосы, вышитые по канве и притом с разными оттенками очень мягких цветов. Вспаханные места представляли несколько фиолетовый отлив. Сжатые полосы, полосы покрытые еще овсом, гречихой и другими хлебами, так же, как и скошенные или оставшиеся под травою полосы, совершенно резко отличались друг от друга оттенками, образуя разнообразнейший ковер, лежавший глубоко внизу. На этот-то ковер мне следовало осторожно спуститься и на это теперь было обращено все мое внимание, помимо некоторых наблюдений температуры, о которых я скажу дальше. Прежде чем начать опускаться, я попробовал способность моих рук управлять клапаном, и именно мне хотелось сперва лишь настолько отворить клапан, чтобы газ вышел отчасти, но потеря его могла бы вознаградиться выливанием небольшого количества воды, т. е. не делать действительного спуска. Прием этот удался совершенно, и я увидел, что можно будет управиться правильным опусканием. Мне нельзя было, однако, для остановки падения рассчитывать на выбрасывание балласта и следовало принять в соображение, быть может, еще не кончившееся высыхание аэростата, которое соответствовало выбрасыванию балласта. Подождал затем минут десять. Убедившись внимательным рассмотрением показаний барометра, что поднимание все еще продолжается, т. е., значит, нагревание и высыхание все еще идут, я решился выпустить столько газа, чтобы чуть-чуть начать опускаться. Это сделано было около 8 ч. 30 м. и, судя по барографу и анероиду, легко было убедиться в том, что опускание в самом деле начало происходить, но идет, не ускоряясь, медленно. Когда клапан был еще раз чуть-чуть приоткрыт, опускание пошло быстро, но оно скоро замедлилось, так что около 8 ч. 40 м. аэростат начал

даже вновь подниматься. Это небольшое поднятие, примерно от 2 до $2^1/_2$ верст, показало мне, что аэростат продолжает еще сохнуть и разогреваться, и что я могу отворять клапан на столько, сколько нужно для медленного опускания, и потому, видя, что подо мной места удобные, примерно в 8 ч. 50 м. я вновь приотворил клапан на столько, чтобы опускание стало совершаться хотя медленно, но непременно. Запас балласта я считал необходимым сохранить до последнего момента приближения к земле. Моя экономия была такова, что я привез с собою даже половину второго мешка с песком. Во все это время дела было много. То измерял температуру воздуха, то вновь определял направление полета, то высматривал места для суждения о том — можно ли среди них удобно спуститься, то пробовал такое положение, в котором при спуске можно будет, держась за кольцо, находящееся над головой, иметь под руками мешок с песком, веревку клапана и нож для подрезывания веревочки, которою якорь прикреплен к корзинке. Стоит упомянуть о том, что на высоте $2^1/_2$ верст я совершенно ясно слышал не только мычание коров, ржание лошадей или удары топора, которые ясно доносились до высоты 3 верст, но слышал даже и пение петухов, а когда я начал спускаться, то на высоте 2 верст стали слышны уже и голоса людей, которые мне кричали. Упоминаю потому, что другие воздухоплаватели нередко говорят о том, что они только на гораздо меньшей высоте могли слышать такие звуки, хотя давно известно, что более резкие звуки, вроде свистка локомотива или даже грохота поезда, слышны еще и на гораздо бо́льшую высоту. Когда же аэростат шел над облаками — тишина была полная. Упомяну также о том, что я усиленно искал в течение нескольких минут хотя бы на горизонте каких-нибудь следов железной дороги и очень опечалился, когда убедился, что нигде не видно железного пути, который бы мог скоро вернуть меня в Клин. Это обстоятельство так же, как и направление движения аэростата на северо-восток и близость Волги, заставили уже думать, что я лечу по направлению к Тверской губернии, тем больше, что мест, подобных тем, над которыми пролетал, на моей карте не было. То, что было внизу, совсем походило на географическую карту, ниже меня лежавшую, но в ней не было подобия с картою Клинского уезда. Какая-то фабрика, а в особенности одно село с близлежащею к нему деревней, долго привлекали мое внимание, и мне казалось, что я оттуда именно слышу крики. Аэростат проплыл почти прямо (судя по гидропу) над этим селом. Теперь уверен — глядя на карту — это было большое торговое село Толдом, Тверской губернии, тем больше, что мне потом рассказывали, что многие жители видели меня летевшим прямо над их головами. Это было около 8 час. 25 мин., судя по моей записной книжке. По подробной

карте Тверской губернии географическое положение этого села: 56° 43 $^1/_2'$ сев. широты и 7°11$^1/_2'$ вост. долготы от Пулкова. А так как аэростат спустился в 9 час. 15 мин. на север от села Спас-Угол, а именно на месте, имеющем сев. широту 56°55′ и вост. долготу около 7°35′, то прямое расстояние от Толдома до места спуска (около 30 верст) пройдено аэростатом со средней скоростью 36 верст в час. От Клина до Толдома по прямому пути около 60 верст, и если бы средняя скорость была та же, то на этот путь должно было бы употребить около $1^3/_4$ часа, аэростат же прошел это расстояние (от 6 ч. 38 м. до 8 ч. 25 м) в 1 ч. 47 м. Следовательно, средняя скорость перемещения, повидимому, была постоянною во все время полета. Но так как не подлежит сомнению, что из Клина шар полетел не на северо-восток, а на северо-запад, так как у меня в записи около 7 ч. 30 м. определено направление движения на юго-запад и так как в верхних областях атмосферы скорость ветра обыкновенно значительно более, чем около земли, то можно думать, хотя уверенности иметь нельзя, что от Клина до Толдома аэростат летел не по прямой линии, а по ломаной, т. е. что направление и скорость ветра изменились в разных слоях и полосах пройденного воздуха, как это часто бывает.

Ранее Толдома аэростат перелетел реку; это была Дубна, и когда начал опускаться после 8 ч. 45 м., мне стало ясным, что в областях более низких, чем $2^1/_2$ версты, направление ветра было более северным, чем первоначальное направление движения. Под конец, у земли, движение стало почти прямо на север. Спускался аэростат медленно, как видно было по барографу и анероиду, и так как у меня в запасе был балласт, то я решил при спуске избрать удобное место для высадки. Три, а может быть и четыре причины определяли медленность опускания аэростата, и они мне были совершенно ясны во время самого спуска, так что мне казалось возможным своевременно, если будет надобно, еще замедлить опускание или даже его прекратить, жертвуя небольшими частями воды и песку, оставшимися в моем распоряжении. Во-первых, и это всего важнее, количество газа, выпущенного при открытии клапана, было мало. От этого тяжесть аэростата или его движущий вес был невелик. Во-вторых, поверхность шара велика, так что сопротивление его было значительно и, следовательно, он мог, как парашют, достигать лишь малой предельной скорости и притом тем меньшей, чем меньше движущий вес и чем больше поверхность. В-третьих, солнце при опускании светило ярко, шар вращался и это содействовало тому, что газ в шаре успевал скоро нагреваться и, следовательно, сжимался не так сильно, как бы сжался, если бы газ сохранял низкую температуру верхних слоев. Наконец, быть может, высыхание еще не кончилось и шар, опускаясь, сох, т. е. становился

легче. Начав опускаться и видя, что опускание идет медленно, как мне было желательно, теперь я стал особенно внимательно рассматривать места, лежащие по направлению моего движения. Спуск был начат не для того, чтобы сразу довести его до земли, а лишь для того, чтобы лучше выбрать место высадки. Впереди были сперва мало, а потом гуще населенные места, и мне желательно было долететь до них.

Сперва шар несся над лесом и местами очевидно болотистыми. Лес и болото неудобны для спуска. Затем представилось озеро. Это озеро имеет сверху вид совершенно круглого пруда и кажется очень маленьким. Судя по карте, оно называется „Золотая вешка". Начиная от него, я летел почти прямо на север. Тут лежит село. С жителями сосёдней деревни прямо начался разговор. Просил их, чтобы следили за аэростатом и готовились к его принятию, а также приготовили бы лошадей. Слышу, мне кричат: „А куды тебе?". Отвечаю: „В Клин". В ответ получаю вопрос: „Чаго?". Когда я повторяю „в Клин", ответа не получаю. Это мне ясно показало, что и слова этого „Клин" жители не знают, т. е., следовательно, что я улетел далеко от Клина. В одной деревне, с жителями которой я также разговаривал, меня позвали есть свежую рыбу. Кричали: „Спущайся, свежая рыба есть". Попробовал я кричать и в рожок, который был привязан к корзинке, но от неуменья ли или от свойства рожка, но почувствовал, что мой голос раздается гораздо яснее и дальше.

Аэростат спускался достаточно медленно, жители очевидно примут хорошо, а балласт еще не был тронут, — это шансы удачи спуска; они возрастали, и так как мне казалось, что шар летит довольно медленно, так что за ним можно следить верхóм, то я, летя над одной деревней, где видел много народа, написал на листе бумаги записку, которую свернул в плотный клочок и бросил. На ней я написал, чтобы ехали верхом за аэростатом. Долго я следил за этим клочком бумаги, как он, крутясь, падал вниз, и мне стало очевидным, что моя записка не попадет среди деревни, как было желательно. В исходе девятого или ровно в девять часов, в виду деревни, я написал на другом листе почтовой бумаги, чтобы собирали народ, потому что хочу спускаться, и бросил, согнув листок лишь в два раза. К моему великому удивлению, бумажка не падала, а неслась вместе со мною. Аэростат в это время вращался, и бумажка летела с ним рядом между теми веревками, которые от экватора аэростата спускаются вниз. Это длилось столь долго, что невольно обратило на себя все мое внимание, и об этом, как и о других впечатлениях, успел записать к себе в книжку. Это обстоятельство очень ясно показывает скорость моего движения вниз и по ветру. Сложите небóльшой листок обыкновенной почтовой бумаги малого размера

в четыре раза и бросьте его так, чтобы он наполовину раскрылся. Он будет падать с известною скоростью. С этой скоростью опускался аэростат. Об этом обстоятельстве упоминаю в особенности потому, что после спуска на землю, отправляясь на юг, в село Спас-Угол, я на пути увидел свой брошенный листок, поднял и сохранил его. Очевидно, что отношение между движущим весом и сопротивлением листка бумаги было такое же, как и у аэростата, и ветер его нес в том же направлении, как и аэростат. Средняя скорость движения при спуске может быть довольно точно определена из того обстоятельства, что в записной моей книжке стоит заметка о том, что я для спуска открыл клапан раньше 9 ч., минуты за две, т. е. в 8 ч. 58 м. Тогда аэростат, судя по барографу и отчету барометра, плыл на высоте $2^1/_2$ верст. Аэростат был на земле около 9 ч. 15 м. Следовательно, спуск с высоты $2^1/_2$ км произошел в 17 минут, что даст среднюю скорость падения $2^1/_2$ м в секунду. Это скорость малая по сравнению с тою, какая бывает очень часто при опускании аэростатов. Так, напр., в первом полете (17 июля 1862 г.) Глешер опускался со среднею скоростью в 5 м в секунду, а бывала у него даже скорость до 10 м в секунду. И все же спуск кончался благополучно, инструменты ломались, а люди оставались целы. Мне же хотелось сохранить даже инструменты. В 9 час. 10 мин. в записной моей книжке стоит высота в 1 версту и записано, что внизу село и народ виден праздничный. Здесь кругом народ в сборе, в селе, в праздничном наряде, тогда как в других деревнях народ находился в поле. Час утра был ранний, рабочий, следовательно очевидно, что в этом селе был праздник, и так как вчера Спасов день, то мне уже стало очевидно, что здесь приход Спаса. Действительно, село, над которым пролетел аэростат, было Спас-Угол, и жители праздновали другой день своего церковного праздника, как и оказалось после спуска. В 9 час. 20 мин. уже сделана мною первая запись после спуска и выхода из лодки. Следовательно, аэростат спустился примерно около 9 ч. 15 м. Так как спуск с высоты $2^1/_2$ верст продолжался всего около 17 мин., а до 1 версты около 12 мин., то начальная скорость его падения была весьма невелика, но потом к концу она возросла. При малой скорости опускания у меня еще была возможность распорядиться местом спуска, как должно. Расчета мне тогда делать было некогда, но я видел, во-первых, что спускаюсь медленно, во-вторых, что могу с своим запасом балласта еще замедлить или даже остановить падение, и в-третьих, что, перелетев болото, озеро и лес, аэростат идет к населенному месту, что было немаловажно. Сдерживать опускание не было надобности и только близ самой земли следовало выбрать получше местечко для удобства падения. Но для этого у меня был еще припасен и сохранен балласт. При быстром спуске ничто уже не действует и ускорение

берет верх, так что сильные толчки неизбежны и препятствия, которые на пути встречаются, не могут быть оставлены сзади.

Ясно сознавая, что мое опускание начато правильно и идет как следует, медленно, я теперь стал приготовляться к последней, самой важной минуте и уже не в общих чертах, а в подробностях выбирать место для удобного опускания на землю. Сверху мне очень отчетливо было видно направление полета и те места, на которые должен пасть аэростат, и после того как он перелетел озеро, необходимо было опуститься, потому что деревень и сел тут было много, а лесов мало. Не видно было и болот. С высоты примерно четверти версты было видно, что, пролетев над селом и еще одной деревней, аэростат опустится примерно в лесок, лежащий за деревней. За этим леском шла открытая поляна без хлебов и изгородей. За ней начиналась другая деревня и за деревней начиналось поле, а там, думал, должны быть изгороди. Лучше всего было опуститься перед этой деревней, перелетев лесок. Тут даже хлебов не повредишь, потому что это было место луговое или покосное. Только нужно было так сделать, чтобы не спуститься в лесок, находящийся после первой деревни, а перелететь его. Все мое внимание направилось именно сюда. Мне говорят теперь часто и многие о счастливых случайностях, меня сопровождавших в аэростате и при спуске. И я невольно припоминаю ответ Суворова: „Счастье, помилуй бог, счастье", да надо что-то и кроме него. Мне кажется, что всего важнее, кроме орудий спуска — клапана, гидропа, балласта и якоря, — спокойное и сознательное отношение к делу. Как красота отвечает, если не всегда, то чаще всего высокой мере целесообразности, так удача — спокойному и до конца рассудительному отношению к цели и средствам. Фанатизм, самозабвение, пыл достигают удачи, но реже. Они нужны для исполнения, их ищут, на них много надеются многие, — особенно привыкшие командовать, — но когда один и командуешь и исполняешь, тогда сознаешь ясно, что пыл и фанатизм надо оставить разве для рук и ног, а в голове и в руководительстве следует сохранить полное самообладание и рассудительность. Эти мысли в аэростате были со мной и здесь меня не оставляют, потому что выработались давно и уложились.

Для того, чтобы перелететь лес, я держал в руках мешок с песком, а потом прижал его телом к краю корзинки. Одной рукой я схватился за что-то вверху, а другую руку держал наготове кидать песок или взять нож для того, чтобы при надобности отрезать якорь. Выбросив часть песку, увидел, что перелетаю лесок, тогда схватился за веревку клапана и его открыл во всю силу. Тут уж народ бежал по направлению к шару, и особенно мое внимание привлек один здоровый молодой крестьянин с добродушнейшим лицом. Он прямо глядел в глаза и очевидно,

что не потерялся, обладал всеми своими действиями. Его я выбрал посредником спуска. Вижу он бежит, а гидроп уже близок к тому, чтобы коснуться земли. Лесок же еще не пройден, а потому я ему кричу: „Держи веревку и замотай". Достаточно было выбросить еще некоторое количество песку для того, чтобы окончательно перелететь край леска, и когда это случилось, я уже отворил клапан, не имея возможности следить за тем, что сделал на земле крестьянин. Говорил мне потом этот крестьянин, Егор Григорьев из соседней деревни Ольгино (Шильково тож), что слышал все, что я ему говорил и успел захватить веревку, как только она коснулась земли. Его, говорят другие, приподняло, он не выпустил и закрепил конец гидропа за дерево. Если бы этого не случилось, т. е. еслиб я увидел, что после открытия клапана корзинка, упав на землю, волочилась по ней, то отрезал бы веревочку, удерживающую якорь, и еще успел бы, вероятно, зацепиться якорем до приближения к деревне, потому что до нее оставалось примерно еще, по крайней мере, с полверсты. В момент опускания я тянул одною рукою клапан, другой рукой держался за веревку, имея, кажется, в этой же руке и ножик, но хорошо не помню, что делали руки и ноги.

Итак, аэростат и я — на земле, на мягкой полянке, не на копне с сеном, до нее всего несколько сажен. Под облаками и над ними — своеобразно, достойно кисти А. И. Куинджи, но я не имею способности живописать, а потому описываю не то, что чувствовал, не то, что настраивало, а то, что делал, и о чем думал, и как обдумывал. Здесь на земле опять картины, люди и сцены преинтересные, они настраивали особо, и жаль, что И. Е. Репин не мог полететь вместе, а я не съумею описать так, чтобы осталось впечатление, похожее на испытанное мной. Знаю только, что оно сложнее и лучше обычных городских впечатлений. Постараюсь однако не пропустить того, что оставило в памяти наиболее отчетливые образы. Первый же момент спуска, знаю, что не сумею рассказать, с его ощущениями и с его обстановкою.

Первое прикосновение с землею произошло без всякого следа заметного удара, а было легким, мягким падением, после которого произошло поднятие на несколько сажен, не знаю на сколько, а затем второе падение было уже совершенно мягкое и аэростат оказался окончательно упавшим на то самое место, на которое упал в первый раз. Следовательно гидроп был уже закреплен и у аэростата не было достаточной силы поднимать, ветер же был слаб для того, чтобы нарушить правильность и мягкость спуска. Но хотя ветер не был силен для того, чтобы помешать правильному спуску, тем не менее он имел довольно силы для того, чтобы на спустившийся аэростат давить с большим напряжением. Это было видно и чувствовалось — веревка гидропа натянулась

Как всегда бывает, аэростат лег по направлению ветра, а корзинка — легла боком, с той стороны, откуда дует ветер, и наклонилась на бок от тяги парусом аэростата. Вот в это-то время, из той гальванической батареи с лампочкой, которую мне хотелось раньше бросить и которая была совершенно бесполезна в этом путешествии, полилась хромовая кислота на мое платье и мое пальто испортилось этой едкой жидкостью, что я, впрочем, увидел только тогда, когда вышел уже из корзинки и успел осмотреться. Опустившись окончательно, после невысокого поднятия или скачка, я все еще держался за веревки и остался на краю корзинки, чтобы тянуть клапан. Первый человек, который подбежал ко мне, а людей бежало много со всех сторон, был какой-то мальчик лет шестнадцати с добрым, чрезвычайно любопытным и типическим — русским лицом. Он, подбежав вплоть ко мне, уставил на меня свои глаза, а когда я его спросил: „Можешь ты тянуть веревку, только крепко и все время?" — он совершенно отчетливо и уверенно сказал: „Буду, буду, все время буду тянуть". Потом подошел еще крестьянин и сказал: „Выходите, барин, здесь будьте покойны, все будет ладно, спустились на хорошее место, народ добрый, будьте покойны". Это оказался потом брат Егора Григорьева, бывший унтер-офицер Преображенского полка, Макар Григорьев. Передав веревку от клапана мальчику, имя которого я не мог потом узнать, я вышел из-под веревок корзинки и очутился в целой толпе народа, сбежавшегося посмотреть на диковину. Став на землю, прежде всего снял шапку, перекрестился, поздоровался с народом и услышал поздравления с благополучным окончанием воздушного путешествия. Макар Григорьев и еще кто-то вновь стали уверять в том, что то место, куда мне пришлось опуститься, есть место хорошее и тут народ добрый, что беспокоиться не о чем. Вид ли мой, или мое положение, или что другое заставляло их повторять это утверждение — не знаю, но у меня была уверенность в добром приеме и тогда, когда, летя, переговаривался с крестьянами. Известно, что бывают, хотя и редко, для воздухоплавателей встречи неприятные. И у меня мелькала мысль, только не тогда, когда спускался или спустился, а раньше, еще в Клину, что спуск после затмения может послужить к подобной встрече, подумать могли, что шар как-нибудь участвовал в затмении. Однако общее добродушие нашего народа давало ручательство за добрую встречу, а здесь она была видна и без уверений. Мне говорили, однако, что в одной деревне, будто бы стреляли в шар, но должно быть это вздор, потому что выстрел был бы мне слышен. Более вероятно объяснение уверений в хорошем настроении народа, данное мне одним купцом, знающим те края: там среди деревень добрых, работящих и спокойных крестьян, попадаются деревни, где масса крестьян озлоблена, худо и мало работает, воровата и, следова-

тельно, рада всякому случаю показать свое озорничество. А аэростат опустился очевидно среди деревень, где господствуют добрые порядки, и Макар, человек бывалый, успокаивая меня, вероятно, думал, что мне может прийти беспокойная мысль о недружелюбных отношениях. Когда толпа подошла к нам с расспросами, он старался ее по возможности удалить от шара и особенно настаивал, узнав это от меня, на том, что шар казенный, что нужно его сберечь вполне и что прикосновение с огнем может служить не только к истреблению шара, но и к взрыву, опасному для окружающих. На мой вопрос мне сказали, что мы находимся в Калязинском уезде, Тверской губернии, Ногорской волости, между деревнями Ольгино и Малиновец, в приходе церкви Спас-Угол или Спаса на Углу, как значится на карте. Здесь вчера был храмовой праздник, а потому сегодня еще не работают и оттого так много народа сбежалось смотреть на шар, за которым давно следили и о возможности спуска которого слышали от священника, барина и трактирщика. Первая на земле запись была сделана в 9 ч. 20 м. и здесь же приписано, что на юг, верстах в четырех, лежит село Спас-Угол и в нем поместье г. Салтыкова, непременного члена мировых учреждений Калязинского уезда, бывшего артиллерийского офицера, как мне объяснил кто-то уже из присутствующих. Один молодец взялся побежать к нему с моей карточкой, на которой я написал, что спустился на аэростате. Записал еще и показание анероида в 750 мм и температуру, которая по исправлении показания термометра была 16.°2. Скоро затем явился и староста, за которым побежал кто-то из присутствующих. Толпа народа все прибывала и вероятно не менее 500 человек было уже в какие-нибудь три или четыре минуты, потому что все были свободны и издали уже видели, где шар должен опуститься. Явившийся сельский староста, немножко чувствовавший себя по-праздничному, стал сперва, как и Макар Григорьев, уверять, что беспокоиться не о чем, что за шаром присмотрят, а когда Макар Григорьев стал советовать оставить шар и пойти к нему в ближайшую деревню, чтоб немножко отдохнуть, староста взялся присмотреть за аэростатом. Но при этом, когда я его просил не дозволять курить и присмотреть, он прибавил: „За пузырем-то мы посмотрим, будь покоен, и прибережем, ну да и за тобой присмотрим и тебя побережем". — „Ты кто такой?" прибавил он, переменив тон, как это нередко водится у нас. Эта перемена тона на меня не произвела желаемого и быть может ожидаемого действия, а Макар Григорьев сделал как-то в сторону старосте надлежащее внушение, так что приключение тем и кончилось. Отвязали от аэростата и взяли с собой мелкие приборы и мою корзинку, в которую все, что можно было, я уложил, также и понесли за мною вслед за Макаром Григорьевым, чтобы отправиться в соседнюю деревню.

Так как раньше того один из присутствующих взялся доставить мою карточку В. Д. Салтыкову, но его усадьба была верстах в трех-четырех, то взялись вновь известить, что я отправился с Макаром Григорьевым, если кто-нибудь придет из усадьбы. Только что мы сделали несколько шагов к деревне, видим, едет тележка на одной лошади и в ней сидят трое: возница и двое, одетых по-купечески. Это, говорят, соседний трактирщик и помощник управляющего. Они подъезжают ко мне, и я слышу следующее: „Ведь, я говорил, что летит комета, и на ней человек сидит. Вот ты не верил, видишь теперь: вот комета и вот человек! Ну что, поверишь мне теперь?" Эти речи говорил добродушнейшим образом крестьянин Андрей Прохорович Мушкин Прокофию Ивановичу Погодину, владельцу трактира, расположенного около села Спаса на Углу. Они пригласили меня с собою в тележку, взялись довезти до усадьбы и целую дорогу рассказывали мне про то, что видели, как я лечу и спускаюсь, и что „эдакая комета в первый раз к ним прилетела", и они, хоть и выражаются таким простым языком и не знают, как называть машину, на которой я прилетел, но понимают, в чем дело, знают, что это должно быть для затмения полетели из Москвы, слышали даже об этом, что всем объяснят и в кармане у них есть даже книжка о затмении, которая им многое объяснила. Действительно в кармане оказалась брошюра о затмении нашего почтенного профессора И. А. Клейбера, очевидно весьма сильно распространившаяся в области, где должно было быть полное солнечное затмение. Здесь оно совершилось при небе вполне чистом и все жители очень ясно видели все, нисколько не боялись, потому что в селе здесь священника очень уважают, а он подробно многим и очень часто рассказывал о том, что произойдет, и предупреждал об естественности и неизбежной необходимости того, что должно произойти. Ехали мы тихо и мои спутники объяснили причину этого тем, что их лошадь сегодня сделала уже много верст и что только по настоянию одного из них, несмотря на усталок лошади, все-таки стали следить за шаром для того, чтобы непременно застать его в момент опускания на землю. Чрезвычайно картинно описывал все дело именно Андрей Прохорович. Он называл аэростат не иначе, как кометою, и описывал подробно, какую быструю смену ощущений произвело в нем все виденное. Он даже говорил, что необыкновенно счастлив тем, что сразу разобрал, в чем дело, и во всю жизнь свою никогда этого не позабудет. Потребовал даже, чтобы я у него на книжке о солнечном затмении написал свою фамилию, день и число, а также просил, чтобы я ему дал свою фотографическую карточку. Прокофий Иванович очень звал заехать к нему в трактир, но около него уже встретил нас и повел к себе Василий Дмитриевич Салтыков. В пути узнал, что его усадьба старинная и что помещики эти здесь ста-

ринные, всеми уважаемые, что теперешний владелец человек молодой, семейный, круглый год живет в усадьбе, рассказали и сколько деток, и что здесь провел детство наш известный писатель Салтыков-Щедрин, и что вся эта местность любит и уважает своих старинных помещиков. Вступив в дом Василия Дмитриевича, я был поражен не одним приветливым приемом хозяев, но и всею обстановкою, которая показала, что здесь старина отлично ужилась с новым. Дом старинный, деревянный, но громадный, с огромными залами, с лишними комнатами. Мебель местами старинная, добродушие старинное, а люди молодые с понятиями также молодыми и с доброжелательством вполне русским. Тут отдохнул не только физически, а всей душой. С большою охотою взялись хозяева отправить те депеши, которые спешил написать, чтобы успокоить, прежде всего, свою семью, а потом и многих лиц, оставшихся в Клину в большом беспокойстве о том, что произойдет при полете. Послал также депеши к военному министру и в Техническое Общество. Хотелось в них сказать, что даже аэростат весь целехонек остался, да оставил это выражение, чтоб его как-нибудь неверно не истолковали. Пока писались депеши, пока мое пальто было приведено в сколько-нибудь возможный для возвращения вид и пока хозяйка распорядилась угостить меня завтраком — прошло должно быть часа полтора. Тогда мы отправились все, вместе с маленькими детьми хозяев, к месту спуска аэростата, и за нами еще все-таки бежал народ, а там на месте мы нашли громаднейшую толпу, думаю, что было человек до тысячи или и больше. Шар лежал уже пластом по земле, корзинка была отстегнута. Урядник давно уже был там. Он встретился нам на пути, когда я ехал в Спас-Угол. Сидя верхом на лошади, он обскакал шар для того, чтобы народ отошел от него, заботился все время о том, чтобы шар никоим образом не повредили, чтобы никто не курил, и, таким образом, нам удалось вполне благополучно уложить шар в приехавшую нарочно для того тележку. В другую тележку положили корзинку, якорь и другие принадлежности аэростата. Здесь я встретил Егора Григорьева и услыхал, что, когда он в первый раз захватил веревку, его приподняло вместе с аэростатом в воздух, а он все же конец веревки не бросил и лишь только шар опустился, успел конец веревки замотать за ближайшее дерево, что и служило одною из причин хорошего окончания спуска. Когда укладка кончилась, староста и десятский стали просить на водку народу за охранение аэростата. Хотел сейчас же вынуть деньги, но Василий Дмитриевич посоветовал сделать это у него дома и велел им прийти к нему. Здесь меня двукратно посетили такие лица, которые считали себя охранителями аэростата, и я, конечно, был очень рад увеличить их праздничные чувства соответствен-

ной прибавкой к заработку соседнего трактирщика, который был еще тут и прямо советовал им не давать, потому что, говорил он, деньги только увеличат кутеж этого дня, и без того для них, во многих отношениях, памятного и примечательного. Депеши прямо от аэростата были отправлены с верховым, меня однако предупредили, что до Калязина верст 30 и раньше, как часам к шести, депеши не могут поспеть. Такой уж тут угол. А очень хотелось успокоить относительно своего спуска и также судьбы аэростата, случайно попавшего в мое распоряжение. Мне удалось так опустить аэростат, что он не получил никакого повреждения, нередко случающегося с аэростатом в момент опускания на землю. Хотелось мне самому привезти аэростат назад, но увидел скоро, что операция укладки при столь праздничной обстановке, какая была в селе, не может быть скоро и спокойно совершена и самая отправка была бы не вполне безопасна для целости аэростата, потому что его пришлось бы везти верст 70 сравнительно скоро, как мне хотелось самому ехать, чтобы скорее быть дома. Был очень рад поэтому, когда, благодаря вниманию В. Д. Салтыкова, оказалось возможным оставить аэростат и все его принадлежности у него в имении с тем, что за ним прибудет или г. Кованько или то лицо, которому он поручит это дело. Это позволило мне не медлить отъездом.

Возвратившись с аэростатом на усадьбу, сдав его и отобедавши с добрыми хозяевами, стал спешить к дому, тем больше, что узнал о путях, которыми можно было добраться до Клина. Близко оттуда, верстах в 20-ти, протекает Волга, но до ближайшей пристани на ней, т. е. до Калязина, было 30 верст, и мне не советовали туда отправляться, потому что пароходы на Волге, говорят, идут теперь в августе неправильно, хотя воды в этот год много, и может быть придется сутки или двое ждать первого проходящего парохода. Посоветовали отправиться на Троицко-Сергиевскую лавру, лежащую на Ярославской железной дороге, хотя до нее больше 70 верст и дорога очень плоха,— однако это скорейший и верный путь. Можно было бы, конечно, ехать и прямо на Клин чрез Завидово или чрез Дмитров, но этот путь считается еще более плохим, чем в Троицко-Сергиевскую лавру. На этом пути можно, по крайней мере, всегда найти ямщиков, и Василий Дмитриевич взялся отправить меня на своих лошадях до ближайшего села Михайловского, лежащего на большой дороге, ведущей к Троицко-Сергиевской лавре. Этот путь мы сделали еще совершенно засветло, но в Михайловское прибыли часу в восьмом, около заката солнца. Нашли ямщика, и я отправился по столбовой дороге, но такой столбовой дороги, как эта, мне не приходилось еще встречать. Целые версты с промежутками нескольких десятков сажен здесь тянется гать,

уложенная вся бревнами, так что нет никакой возможности хоть на одну минуту забыться, при том устатке, который я неизбежно чувствовал от прошлого дня. Полная тьма скоро наступила, и ямщик мой требовал непременно остановки, потому что действительно не видно было ни зги. Мы было постучались в один деревенский трактир, но неприветливые хозяева не взялись даже поставить самовар. Поехали кое-как дальше, и по ступицы в воде мы добрались до какого-то другого трактира около озера Сумизкого в деревне Федорцевой, где славный, услужливый и очень интересный земский деятель, бывший ямщик Борисов, содержит постоялый двор. Если б на моем месте был кто-либо другой, умеющий передавать рассказы о деятелях наших захолустьев, он бы много почерпнул из рассказов, слышанных мною от г. Борисова, когда мы занимались с ним чаепитием. Не мне описывать также и то, как утром ямщик передал меня другому полупьяному, как мы доехали по глубоким колеям до Троицы, как для сокращения пути поехал мой возница по пашне, как он отделывался от нареканий за это, как я рад был уснуть в вагоне железной дороги, как, проснувшись, услышал разговоры про мой полет и т. п.

Возвратившись в Клин, встретил многих ждавших и узнал, как много беспокоились обо мне и как отыскивали. Направление нижнего потока ветра было на северо-запад, а потому думали, что шар туда и полетел. Отправились по железной дороге к Завидову. Начальник станции дал особый локомотив, на котором поехали В. И. Срезневский, А. М. Кованько, мой сын, вместе с начальником ремонта пути г. Онуфровичем. Они на телегах и верхом в разных направлениях изъездили окрестности Завидова и Решетникова, около Волги, кружили по болотам, лежащим около железной дороги,— все искали в северо-западном направлении. Особенно усилили поиски, когда получили известие, что шар видел здесь невдалеке один из сторожей или рабочих на железной дороге. Он рассказывал, что видел шар около железной дороги и когда он скрылся на горизонте. Хотя весьма вероятно, что полет аэростата сперва был на северо-восток и, быть может, он пролетал даже два раза взад и вперед над полотном железной дороги, но в то время под ним были облака и его, кажется, невозможно было видеть. Однако возможно, что в облаках мог быть местный и временный прорыв, которого я не заметил (быть может потому, что в это время был занят хозяйством по шару), а шар чрез него был виден. В. И. Срезневский говорит, что на одной станции, кажется Кулицкой, жители в подобный прорыв облаков совершенно отчетливо видели все полное затмение, хотя на других станциях ничего не видели. Объехав сотню верст проселков, искавшие вернулись и только в Клину, около 6 ч., узнали о благополуч-

ном конце полета. Участие, заботы и труд многих мне не вознаградить моею глубокой благодарностью, но все же она вырывается от всей души. Если в другой раз соберусь лететь на аэростате, все сам постараюсь присмотреть во время подготовления к полету и если полечу один, — а это бы мне было очень желательно, — то вероятно близкие мои и мои друзья не станут столько беспокоиться обо мне. Полетел бы охотно вновь для изучения атмосферы и тогда бы запасся всеми средствами, чтобы от полета остались данные возможно точные, каких теперь еще мало и какими мое воздушное путешествие на сей раз не может похвалиться. Только термометры мои были хорошо проверены и дали показания друг с другом совершенно согласные. Гигрометра не было со мной. Анероиды, бывшие при мне, можно считать проверенными только в грубом виде, а барограф совершенно не выверялся мною, поэтому и высоты могут быть даны лишь приближенные. И без того перевод показаний давления в высоты, как давно известно и как доказывается в моем сочинении „О барометрическом нивелировании“ (1877),—дает ошибки, достигающие до процента, а при тех средствах измерения давлений, какие были при мне, вероятно погрешность не меньше 2, 3 процентов. Приняв во внимание все, что можно и должно было взять, я получил приводимую здесь таблицу высот полета над уровнем Клина:

6 ч. 55 м.	высота	= 2800	м
7 „ 15 „	„	= 3050	„
7 „ 30 „	„	= 3100	„
7 „ 45 „	„	= 3200	„
8 „ 0 „	„	= 3300	„
8 „ 15 „	„	= 3350	„
8 ч. 30 м.	высота	= 2750	м
8 „ 42 „	„	= 2000	„
8 „ 52 „	„	= 2500	„
9 „ 10 „	„	= 2000	„
9 „ 15 „	„	= спуск	

Эти высоты сняты с диаграммы, в которой включены все наблюденные высоты, а промежуточные точки нанесены по барографической диаграмме, у меня сохранившейся. Чтобы сделать более ясным представление о тех высотах, где плыл аэростат, достаточно сказать, что высота Олимпа (2906 м) была достигнута около 7 ч., т. е. примерно чрез 20 мин. после отправления из Клина. Высшая точка подъема немногим превосходила высоту Этны в Сицилии (3302 м), а туда добираются с трудом, употребляя много часов трудного пути. Высоты Монблана и Казбека, не говоря уже о вершинах гигантов Кордильер или Гималая, далеко не были достигнуты в моем поднятии, но давно превзойдены при высоких поднятиях, особенно Глешера. Олимпийские высоты удовлетворить пытливость не могут и любопытное — выше их на много верст. Только сразу и без оглядки кидаться туда не должно даже и тогда, когда будет полная возможность, а летать туда все же нужно и много пользы от этого извлечется, если установится сперва закон нормального равновесия

и потом чрез него узнается и случай нарушенного, неустойчивого равновесия, выражаемого переменами погоды. При этом два изменения — температуры и влажности — наиболее интересны и важны на первый раз, а потом и многое, многое другое, начиная от количества и качества электричества, до количества и качества лучей, от солнца на землю приходящих и определяющих всю жизнь земной поверхности.

В моем полете, очевидно, не было нормального состояния, особенно в первую часть пути — между облаками. Они составляют экран и внимательный разбор данных всех до тех пор сделанных полетов показывает, что до облака и после него изменения температуры и влаги именно идут так, как с экраном ждать должно. А так как мои наблюдения температуры могли делаться только во время пребывания вверху, а не при спуске или подъеме, — тогда было не до отчета термометров и барометров, то в них должно было сказаться ясно влияние облаков. Оно так и есть. Совокупляя исправленные отчеты термометра и относя их с должной поправкой к целым минутам, я получил следующую таблицу:

6 ч. 55 м. — 1.°2 Ц.	8 ч. 0 м. + 1.°6 Ц.
7 „ 10 „ + 0.°3 „	8 „ 15 „ + 0.°4 „
7 „ 20 „ + 2.°9 „	8 „ 30 „ + 2.°0 „
7 „ 30 „ + 4.°7 „	8 „ 40 „ + 3.°4 „
7 „ 45 „ + 3.°6 „	

Затем у меня уже нет наблюдений, все внимание отдано было спуску. На земле в Клину около времени отправления (точнее около 6 час. 20 мин.) температура была близка к 13.°1, а около времени (9 час. 15 мин.) спуска близ Спаса на Углу исправленная температура была около 16.°2. Если возьмем среднее из всех вверху (при высоте около 3 км) наблюденных температур, то получаем при давлении около 500 мм температуру + 1.°6. Средняя же температура на земле была около + 14.°6 при давлении около 750 мм. Допустив ту пропорциональность убыли температуры с убылью давления, которую я вывел в 1876 году (Ж. Р. Ф.-Х. О. и Archiv des sciences, Genève, Mars, 1876, p. 233),[1] из наблюдений Глешера получаем равенство:

$$t = -24.°4 + 0.052\ H,$$

где t есть температура при давлении H. Полученное постоянное ниже обычного, близкого на — 40° Ц. и показывающего температуру того слоя атмосферы, где давление нулевое ($H = 0$). Причина этого ясна. Ее составляют облака, под которыми температура была выше нормы, как это обыкновенно и бывает. Если мы возьмем данное для 8 ч. 15 м., когда была достигнута

[1] Сочинения, т. VII, стр. 15—20 и 30—50. (*Прим. ред.*)

самая высокая точка подъема и облаков не было, то, приняв здесь давление $H = 493$ мм, $t = +0.°4$, а на земле $H = 750$, $t = 14.°4$, получим равенство:

$$t = -40.°5 + 0.0545\ H.$$

Оно довольно хорошо отвечает выводу, который можно извлечь из данных Глешера, собранных в ясную погоду, а это дает уверенность в том, что, изучая дело подробнее и чаще, можно надеяться получить твердый и общий вывод, которого теперь недостает. И пусть окажется в норме изменение температуры иным, чем можно ныне вывести из совокупности данных, дело здесь не в оправдании того или другого вывода, а в том, что закон нормального распределения температуры в атмосферных слоях следует изучить, узнать и понять, а без того наши метеорологические выводы останутся суждениями краба, ползающего по дну морскому и здесь решающего вопросы морских бурь и изменений. Подумайте только, что в наше время, когда решаются (уже отчасти и можно) предсказывать погоду, никто, например, не может сказать, какова будет убыль температуры на высоте нескольких верст зимой, если внизу, на земле, будет холод в 40 градусов и ртуть замерзнет? А знать бы надобно, потому, что, ведь, нижние слои воздуха явно зависят от верхних, там и облака, и родятся бури, и наша погода делается. Мне думается, что тогда на всех высотах будет почти одна температура, но я в этом не убежден сам и никого убеждать не стану, а узнать это легко, и проще всего, лучше всего у нас в России. Пусть не мне достанется возможность собрать данные подобного рода в России, но я не устану настаивать на том, что именно у нас легче и удобнее всего может быть достигнуто решение основной, а потому важной задачи метеорологии — при помощи высоких поднятий в ясную погоду.

Но кроме рассмотренного отношения к основному вопросу метеорологии, замеченные при моем полете температуры дают указания и более частного свойства. Обращу особенно внимание на то, что в наблюденных температурах есть два минимума (6 ч. 55 м. и 8 ч. 15 м.) и один относительный максимум (7 ч. 30 м). Их причина мне кажется ясно зависящею от обстоятельств, относящихся к полету.

Первый минимум (6 ч. 55 м.) очевидно много ниже нормы, потому что тогда высшая точка подъема еще не была достигнута, а температура была самая низкая из наблюденных. Это зависело, прежде всего, от того, что все прочие наблюдения сделаны были в более поздние часы дня, когда температура и наверху повышается. Затем это первое наблюдение в 6 час. 55 мин. было сделано скоро после наступления двух явлений, долженствовавших понижать температуру.

Полное солнечное затмение только что кончилось, солнце только что озарило своим краем, было еще почти все закрыто луною, а это без сомнения должно было понижать температуру. Сверх того ранее, в первые моменты полной фазы, небо было чисто, лучеиспускание свободно, а это содействует охлаждению воздушных слоев. Они еще не успели, вероятно, нагреться от тепла земли и ниже лежащих облаков, хотя наблюдение было сделано уже под облаком. Сколько влияло каждое из трех указанных обстоятельств на понижение температуры, сказать нельзя и вероятно, до тех пор будет невозможно, пока норма температур не будет указана и понята. При совокупности же, как здесь, многих несомненных влияний — нельзя добраться до той простоты, которую всегда получают, изучая природные явления опытным путем, освобожденным возможными способами от мешающих и усложняющих влияний.

Второй минимум, отвечающий 8 ч. 15 м., определен без всякого сомнения тем, что тогда облаков ни сверху, ни снизу уже не было, а точка подъема была высшая, затмение же давно вполне кончилось.

Что касается до относительного максимума 7 час. 30 мин. то его главную причину должно искать в облаках, в их способности заграждать от охлаждения землю и все, что под ними. Это легкая, пуховая шуба, одевающая землю и воздух. Нам тепло в шубе, потому что мы сами составляем источник тепла и не теряем столько тепла, сколько бы стали расходовать, сняв шубу. И воздух под шубой тепел, не прямо от шубы, а от тепла нашего тела. Такова и земля. У нее своя теплота, и облака, ее одевая, греют, согревается и воздух под этой шубой. Притом в 7 ч. 30 м. затмение уже кончилось и солнце стало греть больше, чем было до тех пор, около же 7 ч. 45 м. земля и небо стали открываться, так что раньше и позже 7 ч. 30 м. были условия охлаждения того слоя воздуха, где произведены мои отрывочные температурные наблюдения, весь смысл которых однако, ясно говорит: следует и можно именно с аэростатов изучать температуру атмосферы, и внутренняя Россия для этого изучения представляет во много раз более подходящие условия, чем Франция или Англия и даже Петербург, где этим до сих пор занимались, хотя и то с недостаточною настойчивостью и выдержкою. Если бы мой полет из Клина, ничего не прибавивший в отношении к знанию „короны", послужил бы к возбуждению интереса метеорологических наблюдений с аэростатов внутри России, если бы он кроме того увеличил общую уверенность в том, что летать на аэростатах можно с удобством даже новичку, тогда бы я не напрасно летал по воздуху 7 августа 1887 года.

348. Предисловие к брошюре Котова об аэропланах, 1895. Не опубликовано. 1038/41а.

Из неопубликованных материалов, хранящихся в кабинете Д. И. Менделеева в Ленинградском Гос. университете.

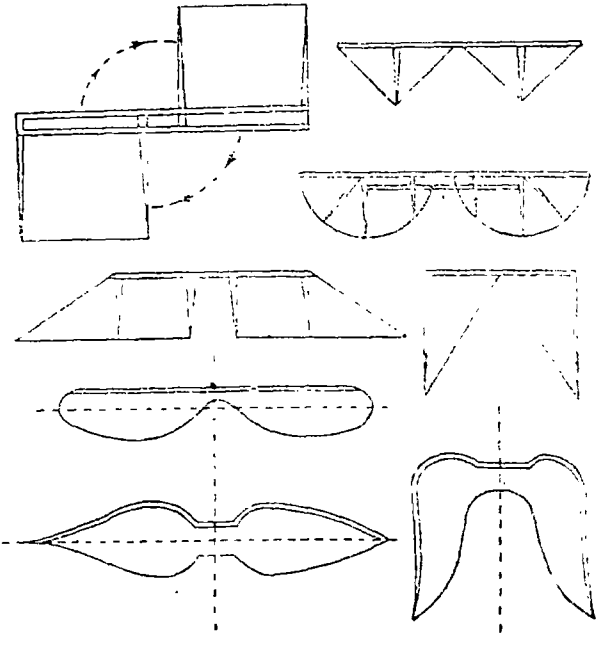
ПРЕДИСЛОВИЕ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

К брошюре В. В. Котова „Самолеты-аэропланы, парящие в воздухе"

В конце истекшего февраля, однажды вечером, ко мне вошел седой господин невысокого роста, с приемом и речами самыми скромными, явно уже поломанный жизнью, рекомендовался он помощником столоначальника в департаменте министерства финансов Виктором Викторовичем Котовым и просил уделить ему немного времени, чтобы посмотреть принесенные им „Самолеты-аэропланы" и посоветовать, что ему дальше с ними делать. Отказать не было поводов, и Виктор Викторович стал вынимать один за другим десятки легких плоских бумажных фигур, закрепленных с передней стороны на тонких (какие употребляются для плетеных сидений стульев) и упругих полосках камыша. Очертания фигур, как видно по рисункам,[1] от треугольников и сегментов, подобных по форме летучим мышам с растянутыми крыльями, до многоугольников и сложных форм, напоминающих в целом распростертые крылья птиц. Величина наименьших была около 4 вершков, наибольших — вершков до 14. Разложив их в порядке на столе, Виктор Викторович взял первую попавшуюся, встал посредине комнаты, расположив, держа за края, плоскость фигуры горизонтально, и, отпустив пальцы, предоставил фигуры падению: каждая полетела вперед жестким ребром, но ровно и спокойно, слабо понижаясь, и села на диван, как сделала бы стрекоза или летучая мышь. Так он перебрал все принесенные „самолеты", и все отпущенные летали, одни скорее, другие тише, одни почти прямо горизонтально, другие, то немного поднимаясь, то опускаясь, третьи видимо по нисходящей кривой, четвертые по заметно восходящей траектории, переходящей затем в нисходящую. Все они были делом его собственных рук и слушались их. Немного погнет он или крылья, т. е. боковые края фигур, или особые в хвосте приделанные рули и этим заставляет лететь

[1] Приводим для характеристики некоторые из этих чертежей, сохраняя нумерацию чертежей подлинника. (*Прим. ред.*)

вправо или влево, а то волнообразно порхать или стремиться прямо вперед. Взял и я одну, у которой приделан сзади небольшой мягкий бумажный хвост, взял за этот хвост, чтобы висела жестким камышевым ребром вниз, плоскостью вертикально, и опустил над столом, от которого фигура отстояла вершков на пять. И она, отпущенная, повернула горизонтально и, не задев стола, полетела вдоль его так же плавно, как и прежде. Пускал ее и спинкой вниз и в разных кривых положениях — всякий раз сам собой самолет выпрямится и, если надо, перевернется, чтобы



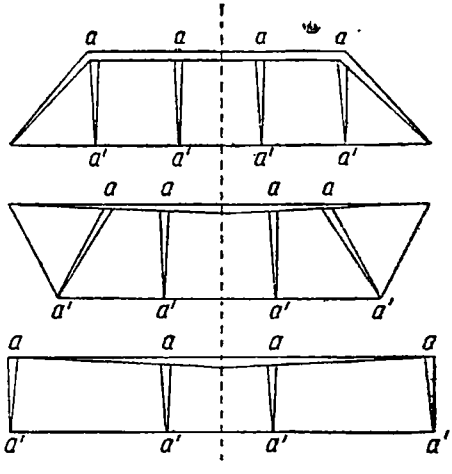
Черт. 7 и 8.

встать в параллельное положение, выравняется почти параллельно с горизонтом и полетит, как и при том случае, когда отпущен в горизонтальном положении вогнутой спиной вверх.

Простота прибора, его замечательная устойчивость на ходу, великое подобие полета с парением птиц, летучих мышей и некоторых насекомых и то обстоятельство, что все виденное мною и более или менее мне известное в отношении аэропланов гораздо сложнее и запутаннее, чем показанное г-ном Котовым, заставили меня не только все это высказать ему, отнестись к его труду с должным вниманием и одобрением, но и разговориться с ним о том, чем он руководствовался, какие делал

первые и дальнейшие попытки, как думает об увеличении размеров, каким путем предполагает достичь получения иной движущей силы, кроме падения, и т. п. Ответы г. Котова показались мне очень достойными внимания и я не распространяюсь о них только потому, что бо́льшая часть их изложена самим Виктором Викторовичем в предлагаемой брошюре, которую он писал по моей просьбе и охотнейшим образом предоставил напечатать.

Будучи далек от мысли о том, что найденное г. Котовым решает совокупность трудных задач, представляемых столь давним стремлением людей летать в воздухе, т. е. вовсе не думая, что после г. Котова, вот завтра—полетят люди, тем не менее я вижу в том, что сделано г. Котовым, ручательство в возможности твердых дальнейших опытов и попыток, направленных к желаемой цели, особенно в виду устойчивости его приборов в воздухе. Поэтому, с своей стороны, я посоветовал ему решить прежде всего вопросы: желает ли он только вложить свое имя, свои труды и успехи в общий запас сведений, касающихся воздухоплавания, или же хочет, по возможности, эксплоатировать свои открытия? В первом случае — все дело следует изложить и опубликовать, а самому продолжать развитие опытов по накопившимся у него взглядам и намекам, т. е встать в число многих, уже ищущих решение задач воздухоплавания при помощи аэропланов. Для такого способа действия нет никаких внешних преград, а самое издание брошюры г. Котова не могло представить задержки, время не будет при этом потеряно. Во втором случае, т. е. при стремлении прямо эксплоатировать уже найденное, следует взять привилегии и позаботиться сделать на основании их что-либо такое, продажа чего окупила бы расходы, и тогда надо не мало денег, затраты сил, особой находчивости практического свойства и немалого времени.



Черт. 4.

В ответ на вышепоставленный вопрос сказался человек, потому что г. Котов прямо и сразу признал второй путь ему несимпатичным, а первый, если можно его осуществить, совершенно для него удовлетворительным. Эта брошюра и является плодом

такого решения. Я взялся издать ее, когда г. Котов заявил, что он доставит мне описание того, что им установлено до сих пор. Так является предлагаемая брошюра.

Так как в предлагаемой брошюре г. Котова не говорится ни о весе, ни о размерах, ни о скоростях его самолетов, то я считаю не излишним прибавить, что я вымерял в этом отношении два из них, оба из числа малых и формы примерно такой, какая дана на чертеже 4. Оба эти экземпляра самолетов летают очень плавно и очень легко сами уравновешиваются в воздухе, т. е. опрокинутые и отпущенные, перевертываются и летят далее, прямо повернувшись вогнутой спинкой кверху. У одного из таких самолетов при общей поверхности около 80 кв. см вес равен 6 кг, а скорость полета около 1.2 м в секунду. У другого: поверхность около 285 кв. см, вес около 1.9 г и скорость полета около 2 м в секунду.

В заключение замечу, что, по моему мнению, для практического применения аэропланов Максима и подобных ему недостает поныне опытных данных со столь устойчивыми в воздухе приборами, каковы самолеты г. Котова, а потому я полагаю, что возможно точное изучение нарочито устроенных моделей самолетов г. Котова (с переменными центрами тяжести и сопротивлений и с изменчивым весом) может содействовать успешному применению аэропланов к искусственному воздухоплаванию. Та настойчивая усидчивость, с которою г. Котов достиг своими личными попытками относительного успеха, дает повод думать, что он, если бы у него была возможность производить сложные, точно выполненные модели самолетов, мог бы внести много новых и полезнейших данных. Для того, чтобы, по мере моих сил, содействовать осуществлению такой цели и в то же время, чтобы сделать известным уже найденное г. Котовым, я и взял на себя труд издать следующую за этим брошюру г. Котова.

С. Петербург, 27 апреля 1895 г.

Рукою Д. И. Менделеева на полях брошюры написано следующее:

„Брошюра г. Котова началась на мой счет печататься (1895 г.) в типографии Демакова, но потом г. Котов захотел продавать свое исследование и брать привилегию, вследствие чего я прекратил печатание и чертежи отдал автору. Здесь приложено то, что было набрано — но затем уничтожено. Ему я достал от Витте пособие. В 1898 г. он помер, а перед смертью приходил извиняться, что поступил неладно. Хороший был старик и мне хотелось его выдвинуть, но не удалось".

Б[illegible]мора: [illegible] напечатав на мой счетъ переплатива (1895 г) въ типогр. Димакова, но потому г. Комаров[illegible] придавать свое исключительное [illegible] и брать привилегію, вслѣдствіе чего я прекратилъ платежи и [illegible] отдалъ автору [illegible] что было набрано — и затѣмъ уничтожено. [illegible] стало [illegible] [illegible]. Въ 1898 г. Онъ померъ, а при смерти [illegible] [illegible], что [illegible] [illegible]. [illegible] [illegible] [illegible] и [illegible] [illegible] [illegible], и [illegible].

898. Много я тут работал и вложил души. Это—часть отчета о возобновл[ении] прототипов.

300. Опытное исследование колебания весов. 1898.

ОПЫТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЯ ВЕСОВ

и

ВОЗОБНОВЛЕНИЕ ПРОТОТИПА ИЛИ ОСНОВНОЙ ОБРАЗЦОВОЙ РУССКОЙ МЕРЫ МАССЫ

в 1893—1898 гг.[1]

(С предисловием проф. М. А. Шателена,
президента Главной палаты мер и весов)

---

[1] Из этого посмертного мемуара Менделеева перепечатываются здесь только места, относящиеся к вопросам сопротивления среды и внешнего трения.
(*Прим. ред.*)

Стр. II-2

Изучение колебаний весов, сверх прямого интереса для взвешиваний (особенно для их расчета), мне кажется, может служить и на пользу при изучении колебаний маятников, так как весы представляют в сущности тоже своего рода маятник с теми особенностями, что в них центр тяжести лежит очень близко под точкою опоры, а центр качания очень далеко под центром тяжести, что с обеих сторон на коромысле повешены подвески (с чашками), также подобные маятникам, что времена размахов велики и что для сопротивления воздуха представляется в весах много точек и площадей. А так как в этих условиях оказываются отступления как от изохронизма размахов, так и от постоянства декремента, то я полагаю, что изучение колебания весов может иметь некоторое значение для усовершенствования самого учения о колебании физических маятников вообще.[1] Так как в весах могут легче и точнее, чем в маятниках, наблюдаться некоторые стороны явлений колебания, то я надеюсь, что предлагаемое исследование послужит некоторым дополнением к опытному учению о колебаниях вообще, тем более, что часть наблюдений произведена в разреженном пространстве, чтобы получить понятие о влиянии сопротивления среды.

Стр. II-23

Время одного размаха t еще явно увеличилось, равно как и декремент D, но уже не от нагрузки, а от увеличенного со-

[1] Считаю не излишним упомянуть о том, что, когда позволит мне время, я предполагаю восполнить настоящее исследование наблюдениями над колебаниями коротких тяжелых маятников разных форм, чтобы связать найденное для весов с тем, что известно для обычных маятников. Этим заявлением, однако, я вовсе не хочу стеснять свободу чьих-либо исследований, если они направятся в ту же сторону, как не связываю и себя обещанием, а желаю только яснее указать на связь предлагаемых исследований о колебании весов с учением о физическом маятнике.

противления воздуха, хотя при этом плотность воздуха и уменьшилась противу той, какая была в двух предшествующих случаях. Притом она уменьшалась и в продолжение наблюдений, как видно и по тому, что в начале t было более среднего, а в конце — менее.[1]

Стр. II-27

Таким образом, первая разведка относительно времен размаха весов показала с полною очевидностью, что:

1) размахи весов не изохронны;[2]

2) они убывают сперва довольно быстро, а потом медленнее, но все же повидимому непрерывно убывают, и эта убыль более ожидаемой по теории для математического маятника;

3) времена размахов находятся в тесной связи с декрементами, и следовательно законы колебания весов должны относиться как к изменению декремента, так и к изменению времен размахов,

и 4) убыль декремента и времен размахов, очевидная—хотя все же малая — в весах, вероятно, существует и в обычных физических маятниках, но по малости величины не замечалась, а должна влиять на точность наблюдений, напр. при определении напряжения тяжести — маятником.[3]

Стр. II-45

Собранные данные прежде всего с полною определенностью показывают, что декремент при уменьшении размахов R или отклонений r постоянно падает во всех тех случаях, когда стройная последовательность уменьшений R или r убеждает в полной правильности хода явления. При первом же приступе к предмету по предрассудку относительно изохронизма размахов и постоянства декремента, взятому из обычных понятий о коле-

---

[1] Убежденный в том, что колебание широкой пластинки, поставленной поперек направления размахов (под влиянием тяжести, на уравнительном для температур стержне), может показывать плотность воздуха при наблюдении как времен размахов, так и их декремента, я составил проект такого прибора, но за недостатком времени еще не мог его осуществить.

[2] Д-р Тизен (Thiesen) в „Travaux et mémoires du Bureau intern. des Poids et Mesures" (1886, t. V, p. 32) уже определил убыль времен одного размаха весов в длинном ряде колебаний (§ 20). Мой друг, проф. Н. Г. Егоров, указал мне сверх того, что подобная же убыль времен была замечена Меркадье (Mercadier) еще в 1876 г. (Séances de la Soc. Française de Physique, 1876, p. 50) при исследовании колебания камертонов значительной величины. Убыль времен размаха видна и в некоторых наблюдениях над маятниками. Но исторически и теоретически важный принцип изохронизма настолько влияет на умы, что до сих пор все это оставляется без внимания. Поэтому-то я и предполагаю после весов обратиться к маятникам.

[3] Хотя мне известна вся трудность наблюдений этого рода для маятников, но я подготовляю их производство и полагаю, что опытное решение вопроса может быть достигнуто путем, намеченным мною. По трудности и новости такой задачи я делаю здесь заявление своего приоритета.

бании маятников,[1] можно было полагать, что только при начальных колебаниях весов, вследствие незакончившегося сгибания коромысла, существуют отклонения от постоянства D. Судя по опыту, можно, однако, полагать, что уменьшение D идет до самого конца наблюдений.

Стр. II-49 и 50

Дело выходит сложнее того, каким оно представляется с первого взгляда,[2] но я не считаю возможным входить в дальнейшие подробности, касающиеся существа замеченных явлений, потому что этот новый, но побочный, предмет требует специальной разработки.

Обобщения и выводы из наблюдений, достигнутые мною, касательно времен, рассматриваются в следующем § 13, но главным предметом исследования служили отклонения, выводимые из них декременты D и законы, их связывающие, что рассматривается в § 14 и следующих параграфах. Повторяю опять: я не уверен в том, что извлек все возможное из собранных данных,

[1] В механике доказывается, что маятник в сопротивляющейся среде дает изохронические колебания и размахи убывают правильно по постоянному декременту, если сопротивление пропорционально скорости. Дело в физическом маятнике, очевидно, сложнее, так как трение ножей не поддается расчету, как неизвестная функция давлений или других подлежащих расчету влияний.

[2] По первому впечатлению я составил себе представление о пертурбациях как об изменениях нормальных колебаний, которые происходят только под влиянием начального размаха, и действующих беспрерывно: массы, ее инерции и сопротивлений всякого рода, тогда как при пертурбациях происходит временное изменение, под влиянием почти моментальных (временно влияющих и внешних) сил, которые можно уподобить толчку, происходящему, например, от дуновения воздуха (см. опыты №№ 866 и 917, стр 23 и 26), или от временного изменения веса, могущего происходить от временного изменения плотности воздуха на одной стороне весов в большей мере, чем на другой, от временной разности в длине плеч коромысла (от бокового нагрева), от сотрясения и т. п. причин. Все эти гипотезы можно было бы подвергнуть испытанию, но у меня и моих усерднейших сотрудников, Ф. П. Завадского и В. Д. Сапожникова, до сих пор, за множеством более настоятельных работ, не оказалось такого большого времени, какое необходимо для подготовки и выполнения подобных опытов. Но если мне позволят время, силы и условия и если у моих сотрудников также они окажутся, я наметил много опытов с точными весами, и среди них упомянутые выше опыты, вероятно, найдут свое место, так как сочетание столь благоприятной обстановки, как в нашей Главной палате, для производства точнейших взвешиваний едва ли можно скоро достичь в ином месте, особенно по той причине, что наша весовая комната приноровлена к превосходному постоянству температур, в ней единовременно помещены многие точные весы, наблюдаемые без приближения наблюдателя, и количество платино-иридовых гирь позволяет иметь нагрузку, неизменную и занимающую малый и почти одинаковый объем (плотность однообразна). Этими замечаниями я желал бы объяснить то обстоятельство, что говорю о пертурбациях лишь кратко и лишь на основании наблюдений, а не особых для их разъяснения назначенных опытов. Без них же мне кажется рискованным входить в подробности, касающиеся пертурбаций, которые можно найти почти во всяком продолжительном наблюдении над колебаниями весов.

а потому в этом параграфе и привел фактический материал, бывший в моем распоряжении,[1] чтобы и другие ученые могли располагать им для дальнейших выводов о колебании весов, наблюдаемом при точных взвешиваниях. Колебания лампады, говорит предание, служили[2] Галилею для обоснования учения о маятнике и тяжести. Исследуя колебания весов, я желал внести посильную лепту в сокровищницу знаний об основных предметах естествознания и тем содействовать усовершенствованию познаний о взвешиваниях как об измерениях, наиболее совершенных и касающихся таинственной области тяготения, сведения о которой, по моему мнению, могут усовершенствоваться и выясняться путем тщательного изучения колебаний, происходящих под влиянием тяжести.

Стр. II-72

Выражая всю совокупность этих данных одною линейною формулою:

$$D = 1.0265 + 0.00038\ r,$$

как видно по числам, можно достичь простейшего обобщения большого числа наблюдений, не выступая из пределов возможных погрешностей, что, до некоторой степени, говорит в пользу допущения, по крайней мере в первом приближении, таких двух исходных положений:

1) *при уменьшении размахов R или отклонений r (колеблющихся весов) декремент уменьшается* и

2) *уменьшение декремента D совершается так, что его можно считать пропорциональным уменьшению отклонений r*, а именно:

$$D_n = d + \alpha r_n, \qquad \text{(VIII)}$$

где d и α суть постоянные для данных весов при определенных условиях взвешивания.[3] К этому следовало бы прибавить третье исходное положение или допущение: *по мере уменьшения размахов декремент приближается к предельному значению d*, которое более единицы, но, во-первых, это уже содержится во 2-м положении, и, во-вторых, желая оставаться на твердой почве действительности, я не имею в виду выставлять гипотезу, содержащуюся в этом 3-м положении, потому что, кроме следствий из формулы (VIII), ничем не могу ее подтвердить, так как прямой опыт при очень малых размахах не может дать надежных чисел для декремента.

---

[1] До конца марта 1898 г., когда эта часть отчета приготовлена для печатания.

[2] В подлиннике „служило". (*Прим. ред.*)

[3] Т. е. по предположению: d и α не зависят от величины размахов или отклонений.

Стр. II-73

§ 16. Физический смысл выражения (VIII) состоит прежде всего в том, что уменьшение декремента колебаний весов идет не беспредельно (т. е. не до единицы — иначе весы бы колебались вечно), а лишь до предела d, которого достигает декремент при размахах, приближающихся к нулю, или тогда, когда достигается равновесие. Следовательно, величина d есть *предел* уменьшения декремента.

Стр. II-81

3) Наконец, по отношению к вопросу о декременте при конце размахов, когда r приближается к нулю, можно отвечать только гипотетически, так как тогда не только декременты, но и самые элонгации не могут подлежать прямому определению, гипотеза же (VIII), положенная нами в основание первого приближения, прямо обусловливает то, что при $r=0$ декремент d есть величина определенная, бо́льшая единицы и характеризующая условия взвешивания и весы. Гипотеза эта укрепляется мыслью о том, что a priori, без внешних пертурбационных влияний,[1] колебания должны же кончиться, а этого не было бы, если бы декремент достигал до единицы, а не до величины большей единицы. Но я воздержусь от дальнейших замечаний по вопросу о декременте около $r=0$, потому особенно, что желаю сохранить за своим исследованием опытный характер, и думаю, что истинное движение вперед при исследовании всех видов колебаний может совершаться только под влиянием теоретических соображений, опирающихся на опыты и наблюдения, собранные с тщанием по плану и в большом разнообразии, но без предвзятых суждений

Стр. II-87 и 88

§ 19. При изучении времен и амплитуд физических маятников доныне расследовали опытным путем преимущественно влияние воздуха или той среды, в которой движется маятник (ее плотности, внутреннего трения или вязкости и количества ее, принимающего участие в движении, Du Buat, Бессель, Стокс и др.) и лишь едва (Бессель, Себейн и др.) касались вопроса о трении твердых частей маятника, напр. ножа о подставку или внутреннего трения (при сгибании), когда маятник качается на гибкой проволоке или нити. Притом, в этих исследованиях маятников, преимущественный интерес составляли до сих пор времена

[1] В действительности такие (§ 11) влияния всегда существуют и, как показывает опыт, колебания весов, даже при большой нагрузке, не прекращаются в 2—3 суток, становясь (от пертурбаций) то меньше, то больше. Предмет этот достоин специального (быть может — сисмографического) расследования.

качаний, так как практическое приложение маятника к часам и для определения изменений в напряжении тяжести требует исключительно знания времен колебаний и длины или расстояния до центра качания. Амплитуды при этом наблюдались и изучались почти исключительно для приведения к бесконечно малым размахам, хотя Стокс (1850, а затем Оскар Э. Мейер, 1871) указывал на изучение убыли амплитуд как на надежный путь для решения основных вопросов, относящихся до колебания физического маятника.

При изучении колебания весов самое их применение для точных взвешиваний заставляет обратить преимущественное внимание на убыль амплитуд, т. е. на декремент, и на выяснение обстоятельств, влияющих на его изменение. Изучение же времен размаха весов становится очень удобным вследствие медленности качаний и связывает оба разряда исследований, но не может стоять здесь на первом плане. Мы видели в § 7 (а также в табл. 9-й) тесную связь между изменениями декремента и времен размахов, но все же как ранее, так и в остальном изложении станем преимущественно говорить о декременте и, рассмотрев его изменение с величиною размахов, теперь перейдем к изменениям декремента (и времен размахов) от следующих обстоятельств в отдельности:

1) от влияния веса (как коромысла, так и чашек с нагрузкою), давящего на призмы (ножи) весов,

2) от влияния изменения чувствительности весов, зависящей, как известно, от расстояния между точкою опоры и центром тяжести,

3) от величины и формы площадей (миделей), перпендикулярных к направлению движения, происходящего при размахах,

4) от объема взвешиваемых предметов,

5) от плотности среды, в которой совершаются колебания,

6) от внутреннего трения этой среды, которое, по закону Максвеля и по опытам Кундта и Варбурга, зависит от частичных свойств газов, а не от их плотности (почти не зависит от давления), и

7) от величины трения среднего и боковых ножей о подставки или подушки, на которых опираются подвижные части весов.

От совокупности индивидуальных особенностей, присущих весам, смотря по их устройству, временной деформации частей и т. п. — все эти влияния отчасти видоизменяются, но конечно по общим, основным законам, которые надо узнать.

Во всех этих отношениях [1] в Главной палате мер и весов собрано уже некоторое количество опытных данных, но я далек

[1] Я имею в виду определить еще влияние звуковых, световых и т. п. колебаний на размахи весов, но опыты этого рода еще не было времени организовать в надлежащем виде.

от мысли о том, что предмет этот, во многих отношениях новый, в каком-либо смысле исчерпан. Напротив того, я думаю, что нужны еще многие тщательные опыты и наблюдения, чтобы иметь право приступить к теоретическому рассмотрению предмета. Поэтому в дальнейшем изложении (как и в предшествующем) будут преобладать опытные данные. В некоторых случаях теоретические соображения сами напрашиваются для освещения собранных наблюдений, но я всемерно стараюсь воздержаться от таких соображений, зная из опыта истории точных наук, что преждевременные обобщения часто задерживали правильную постановку опытных исследований и что только после накопления достаточно разнообразных опытов могут зарождаться столь здравые мысли и такие объяснения, которые ведут к предвидению ненаблюденного, что одно, по моему мнению, и составляет залог достижения истины. Обобщать — „скоро да не споро"—по русской поговорке, я воздержусь. Зато, ввиду бедности опытных исследований, касающихся самоважнейшего измерительного прибора естествоиспытателей, я постараюсь не пропустить даже беглых наблюдений, попутно собранных (до августа 1898 г.) в Главной палате, надеясь что это может послужить на пользу будущего теоретического исследования весов и помочь делу точного их устройства и приложения как в метрологии, так и в естествознании вообще. Если чего возможно достичь в понимании тяготения и тяжести, то, по моему мнению,— не иначе и скорее всего путем точнейших взвешиваний и наблюдений колебаний, при них совершающихся.

В распределении опытных данных я буду следовать порядку, в котором выше перечислены обстоятельства, влияющие на декремент. Но раньше того, я должен оговориться в том отношении, что лишь в немногих случаях, по множеству настоятельных дел Главной палаты, а особенно сложного дела — возобновления прототипов — удалось найти достаточно времени для полной опытной обстановки многих рождавшихся вопросов, а потому некоторые наблюдения и данные страдают отрывочностью. Но и такие наблюдения я считаю не излишним описывать рядом с более полными, по причине, выше объясненной, и еще потому, что мои годы и здоровье уже не позволяют рассчитывать на долгие сроки, так что откладывать — не приходится. [1]

[1] Мне следовало бы здесь особо сказать еще о соотношении между отклонениями r, декрементами D и временами t одного размаха, а также о приведении времен к бесконечно малым размахам (как это производится при изучении колебаний маятника), но, во-первых, об этом говорено кое-что в § 17, во-вторых, я предпочитаю говорить об этом особо, отчасти при рассмотрении зависимости декремента от разных влияний, и, в-третьих, предмет этот, представляющий большой и самостоятельный интерес, я надеюсь, если позволят обстоятельства, рассмотреть в особой статье, когда успею произвести надлежащие наблюдения с маятниками и маховиками. Что же касается до весов, то

Стр. II-89

§ 20. **Влияние веса нагрузки на декремент** (и время t). По всей видимости, в весах, как и в физических маятниках,[1] колебания, т. е. времена размахов и их размеры, а, следовательно, и декремент, много зависят от трения ножей о площадки или подушки, на которые опирается коромысло, и что это трение, составляя главную причину погасания (убыли) размахов, зависит от давления, а давление от веса коромысла +чашки+нагрузка весов или, в маятниках, от всего веса качающейся массы. Предмет же трения твердых тел труден и во многом неясен, а потому ранее, чем судить о зависимости, здесь существующей, я старался собрать возможно полные опытные данные об изменении колебания весов при перемене общего давящего веса P, тем более, что в литературе мне нигде не встречалось сколько-либо полной обработки подобных наблюдений. Одни из наиболее ценных наблюдений этого рода произведены в 1882 г. г. Цвинк (Zwink), по предложению директора берлинского K. Normal Aichungs-Kommission, известного астронома Ферстера (Förster) и по инициативе г. Тизена (Dr. Thiesen), который отчасти их и обработал [2] вместе с Цвинком.

Стр. II-104—106

§ 23. **Влияние газообразной среды на колебания весов.** Ни в одной части учения о физическом маятнике не явилось столь много теоретических и опытных исследований, как в вопросе о приведении к пустоте длины секундного маятника, или, лучше сказать, числа его колебаний в определенное время (обыкновенно в продолжение „средних" суток). Об этой поправке „на пустоту" с почина Ньютона явилась целая масса мемуаров пер-

---

в предлагаемом исследовании имеется много данных для исследования указанных вопросов, и некоторые общие выводы очевидны прямо из данных сопоставлений, особенно в §§ 13 и 18 и в дальнейших, начиная с § 20.

[1] В теории физического маятника, однако, доныне предмет этот остается почти нетронутым; предполагается, что физический маятник свободен, как математический, а между тем трение ножа совершенно равнозначуще с трением оси в подшипниках. По этой-то причине я и предполагаю произвести несколько наблюдений над тяжелым маятником, качающимся на цапфах, трение в которых более всего подходит к случаям, практически исследованным для машин и колес. Особый интерес в этом отношении представляют колебания тяжелого махового колеса (на разных подшипниках), неравномерно нагруженного на окружности, так как по уничтожении этой неравномерности есть возможность получить понятие о трении, заставив маховик вращаться и определяя закон убыли угловой скорости.

[2] Они описаны и приведены в полноте в „Travaux et mémoires d. Bureau international" (v. V, 1886. Observations, pp. XVI—XVIII). Вес литра воздуха — не приводится.

[Далее приводится обработка наблюдений Цвинка и наблюдений, произведенных в Главной палате. (*Прим. ред.*)]

воклассnейших ученых, которые собраны C. Wolf'ом (1889) в IV и V томах „Collection de mémoires relatifs à la Physique" (издаваемых Французским физическим обществом), что позволяет избежать изложения сложных исторических подробностей, [1] касающихся влияния среды на колебания маятника, т. е. преимущественно на времена размахов.

Если такая сложность существует в отношении к влиянию среды на колебания маятника, то тем паче того же должно было ждать в отношении к весам. Тем не менее я решился произвести ряд опытов с весами, надеясь хотя бы немного уяснить следующие три стороны предмета:

Стр. II-106 и 107

1) Как изменяются, при постоянной (обыкновенной) температуре для весов, D и t с переменою плотности среды, т. е. воздуха (от уменьшения давления), от обыкновенной, близкой к $e=1.2$ (вес миллилитра в миллиграммах), до $e=0.1$, когда, по

[1] Ньютон, наблюдая колебания маятника в воздухе и воде, обратил внимание только на убыль размахов и приписал существующее при этом замедление времен потере в ускорении, зависящей от потери веса. Du Buat (1786) из подобных же опытов, изменяя вес, объем и форму тяжелой части маятника, вывел, что вместе с твердым телом колеблется и некоторая часть жидкости (воды или воздуха), количество которой определяется объемом и формою тела маятника, а это заставляет увеличивать Ньютонову поправку „на пустоту". Бессель (1826), не зная того, что нашел Дю-Бюа, произвел опыты в воздухе и в воде с маятниками разной плотности и формы и обратил все свое внимание исключительно на времена колебаний, причем пришел также к заключению о необходимости увеличить Ньютоновскую „поправку на пустоту", считая, что частицы среды изменяют момент инерции маятника. Sabine (1829), а потом Baily (1832) прямо из опыта, считая число колебаний маятника в обыкновенном воздухе и затем в разреженном (до давления 25—300 мм), нашли поправку „на пустоту" и подтвердили необходимость увеличить Ньютоновскую поправку и изменять ее в зависимости от формы маятника. Poisson (1831) расчел, что истинная „поправка" должна относиться к Ньютоновской, как 1 5 к 1, а Challis (1883), как 2 : 1, исходя из определенных гипотез об участии газов в движении маятника. Дело это вслед за тем, повидимому, вполне уяснилось, когда Stokes (1850) приложил к расчету понятие о внутреннем трении газов и согласовал определения Baily и др. со своими расчетами для шаровой и цилиндрической формы маятника, приписав все наблюденное исключительно среде. Но так как трение ножей (призм) и округлая форма их острия (Лаплас, Бессель) оказывают свое влияние на время колебаний и так как, по Максвелю, внутреннее трение не зависит от давления (что подтверждают опыты до давлений еще меньших, чем у Себейна и Бэли), то очевидно, что дело остается и поныне сильно запутанным, хотя не подлежит сомнению, что Stokes первый (а за ним O. Meyer, 1871) пошел по пути, наиболее обещающему в разрешении сложнейшего вопроса о влиянии среды на движение маятника, тем более, что связал изменение времени с изменением амплитуд (т. е. с декрементом). Незаконченность вопроса, по моему мнению, зависит от того, во-первых, что еще и ныне часто считают времена зависящими исключительно от квадратного корня длины синхронического простого маятника и не зависящими от сопротивлений; во-вторых, от того, что вовсе не принимают во внимание трения ножей, когда изучают времена колебаний; в-третьих, от того, что обыкно-

всем существующим сведениям (Максвель, Кундт и др.), внутреннее трение воздуха сохраняется?[1]

2) Как изменяются D и t для весов при изменении внутреннего трения среды? Для этой цели (при обыкновенной температуре) представляется единственно удобное средство, а именно замена воздуха водородом, так как коэффициент внутреннего трения μ для него почти в два раза менее, чем для воздуха (при 15°, по Kundt und Warburg, для него $\mu = 0.000179$, а для водорода $\mu = 0.000092$ г/см·сек.).

3) Как изменяются D и t при перемене объема и формы (особенно горизонтальной проекции) взвешиваемых предметов?

Опытною постановкою таких вопросов, сверх всего прочего, я полагаю возможным содействовать выяснению некоторых, еще спорных, сведений, относящихся к маятникам, особенно если иметь в виду не только декременты, но и времена размахов.

В этом параграфе приводятся данные, касающиеся изменения самой среды, а в следующем — относящиеся до влияния формы, но я не считаю накопленные данные сколько-либо исчерпывающими указанные вопросы, и привожу их исключительно потому, что в литературе, касающейся весов, не нашел никаких для них ответов.[2]

Из этого сопоставления средних результатов[3] видно, что при уменьшении плотности воздуха в 7 раз время размахов осталось — в пределе возможных погрешностей[4] — почти неизменным (хотя небольшое уменьшение — от 30.65 до 30.55 — и оказалось в среднем), т. е. если и существует уменьшение вре-

---

венно D и t изучают порознь, и, в-четвертых, от того, что во всей теории сопротивлений еще нет надлежащей ясности или твердых исходных положений.

[1] Опыты с колебанием весов в воде и других жидкостях хотя давно мною намечены, но за множеством других дел еще не могли быть выполнены, тем более, что для этого следует построить совершенно новый прибор.

[2] Далее идет описание соответствующих опытов, из которого здесь печатаются только выводы Д. И. Менделеева. (*Прим. ред.*)

[3] Будет ли то же самое для всех и всяких весов, мне кажется, сказать нельзя — без новых опытов. Дело в том, что весы Неметца (табл. 12 и 13) резко отличаются, напр., от весов Рупрехта (табл. 10 и 11), тем, что в первых из них время t мало изменяется при перемене нагрузки (и других условий), тогда как во-вторых оно при этом сильно изменяется (зато декремент — мало, а для весов Неметца — сильно изменяется).

[4] Себейн (его опыт 1-й), заставляя качаться оборотный маятник Кетэра в воздухе при давлении 29.845 дюйм., получил длительность размаха = 1.00538 сек., (число колебаний в $N = 85937.47$), а при давлении 7.08 дюйм. (т. е. в 4.2 раза меньшем) = 1.00530 сек., следовательно, разность менее $\frac{1}{10\,000}$. В наших наблюдениях такая часть $t = 0.003$ сек., но точность наших отчетов времени от этой очень далека, а потому, быть может, весы в разреженном воздухе и качаются быстрее, как показывают и наши опыты, но это нельзя считать известным в точности.

мен, то оно очень мало и его нельзя установить в наших определениях.[1] Что же касается до декремента, то при уменьшении плотности воздуха он несомненно уменьшается, так как разность полученных чисел (1.0347 и 1.0320) явно превосходит возможные погрешности, как видно и по сравнению отдельных определений в обеих группах, а также потому, что №№ 921—923 дали больший декремент, чем №№ 926—928, когда e уменьшилось. Притом, если изменение D принять почти пропорциональным перемене e (а именно в данном случае можно приближенно принять: $D_{15}=1.0316+0.0026\,e$), то можно заключать, что в полной пустоте ($e=0$) и при данных условиях декремент был бы близок к 1.0316.

Стр. II-108 и 109

Отсюда, по отношению к t и D видно, в сущности, то же, что и при разрежении воздуха, а именно: 1) времена размахов или не изменились при замене воздуха водородом, или, если убавились, то мало (быть может отчасти под влиянием некоторого изменения k,[2] а не только от перемены внутреннего трения), и 2) декремент при замене воздуха водородом несомненно уменьшился, но это изменение явно больше, чем при разрежении воздуха. Так (стр. 106), при уменьшении плотности атмосферного воздуха в 7 раз $D-1$ уменьшилось в $\frac{0.0347}{0.0320}$ или в 1.08 раза, здесь же при уменьшении e в $\frac{1.22}{0.083}$ или в 14.7 раз $D-1$ уменьшилось в $\frac{0.0325}{0.022}$, т. е. в 1.5 раза. Выше, судя по одной плотности, можно было полагать, что в пустоте D будет $=1.0316$ при данной погрузке (1 ф. + чашка) и при k около 0.053 мг. Здесь, судя опять только по плотности e, можно вывести, что при той нагрузке и при k около 0.050 мг, декремент в пустоте будет близок к 1.021. Разность результата, очевидно, превосходит пределы погрешностей. Отсюда, так как внутреннее трение водорода гораздо менее, чем воздуха, очевидно, следует, что *декремент колебания весов (Неметца), явно уменьшаясь при убыли плотности атмосферы, в еще значительно большей мере убавляется при уменьшении внутреннего трения среды* μ, и следовательно, во всяком случае, очевидна зависимость декремента как от плотности газа (e), так и от его внутреннего трения.[3]

---

[1] Хотя в общем среднем в разреженном воздухе получилось менее, чем под обыкновенным давлением, но разность (равная 0.10 сек.) меньше возможных ошибок (*стр. II—55*).

[2] Число миллиграммов, отвечающих одному делению шкалы. (*Прим. ред.*)

[3] Вывод, сделанный выше из наших наблюдений над весами Неметца, по отношению к D, не может быть сделан по отношению к временам колебания

В пустоте[1] декремент должен еще много превосходить единицу, т. е. $D-1$ тогда несомненно имеет еще очень большое значение.

---

t — маятника — из опытов Себейна, который произвел наблюдения над маятником Кетэра в обыкновенном и разреженном воздухе и в водороде (см. упомянут. выше „Coll. d. Mémoires", V, 158—163). Через N означено далее число колебаний в сутки (очевидно, что $86400/N$ равно нашему t) при температуре 36° Ф.; через h означено давление при 0° в дюймах ртутного столба.

№ опыта	Воздух обыкновенный		Разреженный газ		Водород	
	h	N	h	N	h	N
V	29.762	86305.83	0.653	86316.21		
VI	30.196	86305.64	14.116	86311.35		
VII	30.193	86305.57	—	—	30.192	86314.08
VIII	30.113	86306.39	0.872	86316.90	30.120	86314.95
Среднее . .	30.07	86305.9	5.21	86314.8	30.16	86314.5

Отсюда видно, что в водороде длительность колебаний почти та же — в пределе погрешностей опыта, как и в разреженном воздухе, но при увеличении плотности, т. е. в обыкновенном воздухе, t больше (т. е. N — меньше); иначе говоря, это значит, что плотность среды явно влияет на время, а внутреннее трение — если и влияет, то косвенно, и мало зависит от μ. Я полагаю, что сделанные мною выводы по отношению к влиянию μ на D косвенно подтверждают выводы Стокса (1850), но в поисках истины я не считаю полезным умалчивать о том, что влияние внутреннего трения сильнее выступает в изменениях D, чем в перемене t.

[1] Свод средних дает для наших условий (весы Неметца, навеска каждой чашки 516 г, k от 0.055 до 0.50 мг) примерно следующее:

	e	μ	D_{15}
Воздух под обыкновенным давлением	1.21	0.00018	1.034
Воздух под уменьшенным давлением	0.17	0.00018	1.032
Водород под обыкновенным давлением . . .	0.083	0.00009	1.022

Если считать, что изменение декремента пропорционально изменению не только плотности среды e, но и коэффициента внутреннего трения μ, то:

$$D_{15} = 1.0121 + 0.0019\ e + 109\,\mu.$$

Отсюда, повидимому, можно думать, что в среде, где не только плотность $\mu = 0$, но и коэффициент внутреннего трения $\mu = 0$ (т. е. в мнимой полной пустоте) декремент в наших условиях был бы $= 1.012$. Сверх того, можно думать, что декремент D_{15} в обыкновенном воздухе превосходит декремент в пустоте почти исключительно (но не вполне), потому что внутреннее трение такого воздуха велико.

Наконец, с практической стороны считаю не излишним указать на то, что, судя по нашим опытам, для уменьшения сопротивления среды и для уничтожения влияния перемен в давлении воздуха часы и маятники лучше помещать в замкнутую (хотя бы даже не разреженную) атмосферу водорода, чем в разреженный воздух.

Стр. II-110

§ 24. **Влияние формы и объема взвешиваемых тел на колебание весов.** Среда влияет замедляющим образом на колебание, очевидно, только потому, что уступает место колеблющемуся телу, и ее частицы должны совершать при этом известные перемещения, что и поглощает часть тех сил, которые производят колебательное движение. Поэтому, если плотность и вязкость среды влияют на колебания, то на них должны подобным же образом влиять также формы (размеры и очертания) колеблющегося тела,[1] как это известно для всех видов движения и как это вытекает из понятия о сопротивлении. В этом параграфе сообщаются некоторые отрывочные опыты, относящиеся к этому предмету, произведенные в Главной палате с весами, наблюдая изменения k, t, D при разных формах и объемах тел, нагружаемых на чашки весов.

Стр. II-114

§ 25. **Влияние трения ножей на колебания весов.** Из всех видов „сопротивлений" или сил, возникающих от движения, которому они стремятся противодействовать, наименее изученным и наиболее темным остается поныне трение твердых тел. А то видоизменение его, которое проявляется в маятниках и весах, снабженных ножами (призмами), опирающимися на подушку, не только почти вовсе не изучалось,[2] но и очень трудно для изучения, потому что здесь нет тех видимых относительных перемещений трущихся тел, какие свойственны „скользящему" и „катящему" трению, так как острое ребро ножа покоится на подушке и существует только перемена углов и угловых скоростей между гранями ножа и подушки. А между тем на преодоление этого вида трения, очевидно, идет часть энергии колебаний, если они потухают в пустоте.[3] Необходимо много новых опытных исследований, чтобы, во-первых, узнать законы трения, действующего между острием призмы и подушкою, на которую она опирается, и, во-вторых, найти способы

---

[1] А также размеры и формы того пространства, в котором совершаются колебания, в весах—их шкафа. Но предмет этот, отчасти уже исследованный для маятников, не подлежал нашему изучению, а потому не считаю надобным над ним особо останавливаться.

[2] О том, что мне известно сделанным ранее сего в отношении трения ножей на подушках, я считаю необходимым кратко упомянуть в выносках этого параграфа. Здесь же я упоминаю отчасти и о том, что мне кажется полезным сделать в отношении изучения трения твердых тел и что я преднамереваюсь выполнить, если обстоятельства это позволят.

[3] Этот опыт, мне кажется, следует сделать вновь, взяв легкий маятник с возможно твердою (из алмаза или корунда) подушкою и, заключив его затем в стеклянную трубку, из которой выкачать (лучшим ртутным насосом) со всем возможным совершенством воздух, затем эту трубку запаять.

для измерения этого трения и зависимости от него декремента. Опытные исследования, которые до сих пор произведены в Главной палате в указанном направлении и сообщаются вслед за сим, едва составляют некоторое начало того долгого пути, на котором может явиться ответ на предстоящие вопросы, и я сочту свою первичную цель совершенно достигнутою, если мне удастся показать интерес, заключающийся в исследованиях указанного вида трения, и если это побудит к нахождению способов для его изучения и измерения, тем более, что излагаемые далее немногие опыты произведены с обычными весами, а здесь, очевидно, необходимы новые точные измерительные приборы.[1]

---

[1] Два из них я успел выполнить в простейшей форме и оба обещают дать полезные результаты, а потому будут мною выполнены в улучшенном виде, тогда и будут сообщены результаты наблюдений. Первый прибор представляет вид двойного маятника: один — внутренний — маятник на призме, ничем не отличается от обычного, другой же — наружный, синхронический с первым, — на уровне своей оси снабжен подушкою, на которую опирается внутренний маятник. Если оба маятника пустить в ход в одном направлении и вместе, то для внутреннего маятника не будет изменения угла между ножом и подушкой. Если наружный маятник оставить без движения, то для внутреннего будет известная перемена упомянутого угла. Она сделается двойною или вообще увеличенною, если оба маятника будут качаться в разные стороны. Надеюсь чрез это получить некоторые, хотя бы качественные, сведения о той роли, какую играет здесь угловая скорость между ножом и подушкой.

Другой прибор, представляющий тяжелый, снаружи сплошной, внутри полый маховик, назначается для измерения величины трения и для опытного определения зависимости t и D от угла отклонения. Когда грузы, помещенные в полости маховика, будут распределены столь равномерно, что центр тяжести придется на оси, тогда наблюдение над убылью скорости вращения даст элементы для определения трения, даже — если окажется необходимым — при переменных скоростях. Затем, распределив внутри маховика прежние тяжести неравномерно, маховик превратится в маятник, убыль размахов которого можно наблюдать, даже начиная с углов очень больших (почти до 360°), что по меньшей мере дополнит и расширит сведения о зависимости в физических маятниках между убылью D и t от убыли r (или угла α в формуле § 7, стр. II-20), если и нельзя будет (изменяя грузы) определить истинную величину трения и его коэффициент.

Задумав эти и несколько иных приборов, назначаемых для изучения трения, но успев их осуществить только в первичной форме, я предполагаю тем содействовать выяснению указанного вида трения, сводя его на более известные виды трения и определяя обычный коэффициент трения (или как отношения давления к трению или как тангенс угла скольжения), чтобы получить численные величины для проверки соображений, которые ныне одни господствуют по отношению к указанному виду трения.

Особенно настоятельно из опыта вывести, к какому роду трения (скользящему или катящемуся) ближе стоит трение ножей на подставках. То, что сделано мною до сих пор, повидимому, показывает его близкость к трению „катящемуся“, но, так как опыты, сюда относящиеся, еще лишь начаты и я предполагаю возвратиться к этому предмету особо, то я не решаюсь ни высказываться окончательно, ни описывать сделанных попыток, между которыми упомяну лишь об определении угла наклона подушки к горизонту, при котором начинается скольжение на ней ножа.

Стр. II-119—121[1]

Правильная стройность выводов очевидна: *k — возрастает* (чувствительность уменьшается), *время* одного размаха t_{15} (равного 15 div.) *уменьшается*, а *декремент* D_{15} *возрастает* — при замене твердых подушек все более и более мягкими, т. е. трение ножей изменяет все элементы колебания, при том же положении центра тяжести всей движущейся массы.[2] Это показывает, что колебания как весов, так и всяких маятников зависят не только от отношения моментов инерции к статическому, да от сопротивления среды, но и от момента трения, т. е. от качества ножа и подставки под ним. Для определения этого последнего (т. е. трения ножа) недостает современных сведений ни о величине трения в случае колебания острия ножа (призмы) на подставке, ни о плече, на которое действует эта сила. Полагать надо, что здесь большую роль играют два обстоятельства: во-первых, те упругие (не остающиеся) деформации, которые совершаются при колебаниях в острие кожа и в подставке,[3] и,

---

[1] Из § 26 (Изменение колебаний весов под влиянием перемены трения ножа; стр. II-116 до II-121) мы приведем только заключительную часть. (*Прим. ред.*)

[2] Иначе сказать: коромысло весов, маятник или иной предмет, снабженный призмою, на ребре которой происходят колебания этого предмета, — не свободны в своих движениях. От трения ребра призмы о подставку центр тяжести как бы удаляется. Это, повидимому, можно было бы доказать опытным путем, определяя для коромысла весов истинное положение центра тяжести (но такую пробу я еще не успел сделать). Может быть даже, что при установке на большую чувствительность центр тяжести самого по себе коромысла лежит уже не ниже, а выше так называемой точки опоры или острия призмы, так как трение как бы удаляет центр тяжести. Принимая округленность ребра призмы (что фактически, вероятно, и существует), можно и в статических данных найти некоторое объяснение этого понижения центра тяжести при колебаниях, так как тогда происходит не колебание около острия, а катание на округленности ребра по плоскости подставки. Но истинное объяснение все же должно искать в динамических явлениях, происходящих при колебаниях как в призме, так и в площадке, на которую опирается призма, и в условия колебания весов (равно и маятников) вводить определения центра качания. Несомненным кажется и то, что при колебаниях происходит, сверх всего, и некоторое скольжение, возбуждаемое боковыми силами (слагающими), которые при перемене свойств подушки или призмы должны изменяться. Словом, вышеприведенные наблюдения и ранее известное заставляют считать „трение ножа на подставке" явлением очень сложным. Я предполагаю, в ряде уже начатых опытных исследований этого вида трения, итти с более подробных определений влияния твердости ножа и подставки, что должно составить предмет особого сообщения.

[3] Упругие деформации или изменения, происходящие при колебаниях весов или маятников, в ноже и подушке, каковы бы они ни были, теоретически несомненны. Можно думать, что они прямо или косвенно связаны с твердостью и упругостью материалов, из которых сделаны нож и подушка. Что же касается до остающейся деформации, то она может состоять или в притуплении острия ножа, или в остающемся следе на подушке, или, наконец, в упру-

во-вторых, форма (закругленность) острия ножа или призмы. Последнее указано было еще Лапласом и рассматривалось Бесселем при обсуждении качаний маятников.[1] А так как для основательного суждения о том и другом из этих влияний (а еще более об их совокупности) ныне недостает еще опытных данных, то указанные выше данные о значительном влиянии трения на декремент и на время размахов заставляют поставить

гом последействии, которое изучалось при кручении и в других случаях. Все это подлежит опытному изучению. Часть опытных материалов, сюда относящихся, собрана для маятников трудами Бэли (Baily, 1832) и Деформа (Séances de la Soc. Franç. de Physique, 1893—40), но еще многое остается неясным. Практика Главной палаты мер и весов не указывает заметных изменений в чувствительности весов, часто применяемых для взвешиваний, так что о постепенном притуплении острия призм я не могу пока высказаться с определенностью, но должен заметить, что для этого, быть может, наши сроки (с 1893 по 1898 г.) чересчур коротки. Разнообразные данные, приводимые в этом издании, и повторение подобных же исследований в будущем, вероятно, дадут ответ, более уверенный. Здесь мы касаемся затем существа сложного вопроса о трении твердых тел, так как по мнению, не раз высказываемому (но мое мнение в этом отношении еще не сложилось), — трение зависит от стирания трущихся частей, а можно взглянуть на него, как на простое взаимодействие соприкасающихся поверхностей, долженствующих (как видим по электрическим и химическим явлениям) представлять свой род молекулярных движений и состояний. По моему мнению, вообще, точное и подробное изучение трения твердых тел представляет множество интересов, но сопряжено с чрезвычайными экспериментальными трудностями, преодоление которых тем завлекательнее, что трение твердых тел имеет прямое приложение в электричестве и во многих отраслях промышленности, особенно в машиностроении.

[1] Бессель в 1826 г. (см. „Collection de Mémoires relatifs à la Physique", publiés p. la Soc. Franç. de Physique, Mémoires sur le pendule, tt. IV et V), предполагая сечение округленности острия кривою 2-го порядка, указал зависимость времен качания маятника от элементов, определяющих указанную округленность. Предполагая округленность острия ножа или призмы, должно сводить рассматриваемое трение (сколь бы мал ни был радиус кривизны) на „катящее" и вводить во все расчеты плечо трения. При своем исследовании Бессель (1828), руководясь замечанием, сделанным Себейном (Sabine), произвел также опыты для опирающегося острием призмы на разные подушки. Когда, напр., наибольший груз маятника был внизу, времена одного размаха были:

на агатовой подушке . . . . . $t = 1.0009455$ сек.
на подушке из закаленной стали . . . . . $t = 1.0002459$ сек.

При другом опыте получилось:

на агатовой подушке . . . . . $t = 1.000305$ сек. (среднее из двух определений)
на подушке из неполированной латуни . $t = 1.000219$ сек. (среднее из трех определений)

Хотя разности времен t здесь не превосходят иногда десятимиллионных долей секунды, тем не менее, как и в наших опытах, для стали время t более, чем для агата, а для латуни — менее, чем для агата. Отсюда, казалось бы, должно было ясно заключить, что время t зависит от трения при агатовой подушке, как и при всякой иной (и что на закаленной стали оно более, чем на агате), а потому должно было бы ждать исследований, сюда направленных, и их обсуждения при определении длины секундного маятника. Но трудность этого предмета и усилия, направленные при маятниках на сопротивление среды

вопрос на очередь. Однако, все известное не позволяет входить в окончательное суждение — без массы новых, возможно точных и разнообразных опытов. Одно становится очевидным: время размахов сильно зависит от трения ножей, оно в наших опытах сократилось слишком в 2 раза при переходе от стальной (сильно закаленной) подушки к мягкой — из твердого каучука; следовательно, времена колебания маятников, обыкновенно наблюдаемые на агатовых подушках, должны быть исправлены на трение, но размер необходимой поправки не известен ныне. Его надо искать уже для того, чтобы узнать истинную длину секундного маятника и истинную величину ускорения тяжести, находимую по длине секундного маятника. Это составляет один из выводов наших опытных исследований колебания весов.[1]

На этом замечании я считаю необходимым закончить эту главу, предполагая, если позволят обстоятельства, продолжить опытное исследование над колебаниями весов и введя в круг работ маятники и другие приборы, могущие выяснить общие задачи, выступавшие при изучении колебания весов. Три стороны дела заслуживают, по моему мнению, особенного внимания: закон убыли декрементов с величиною размахов, убыль времен, при этом замечаемая, и трение в опорах. А так как все это входит в задачу об определении напряжения тяжести, и абсолютные данные об этом предмете необходимы в деле, преследуемом Главною палатою мер и весов, в которой совокуплено много условий, необходимых для преследования указанных задач, то исследования, сюда относящиеся, будут, по мере возможности, включены вокруг работ Главной палаты мер и весов.

Стр. 129—130[2]

13) Когда, выкачиванием, в 6—12 раз уменьшается плотность воздуха, в котором происходит колебание весов, время t одного размаха (при определенной величине r) изменяется очень мало, но декремент явно уменьшается.

14) Колебания весов в атмосфере водорода — при обыкновенном давлении — совершаются не так, как в воздухе при разрежении его до той же плотности, а декремент уменьшается еще более, так что изменение внутреннего трения среды (оно для

и на влияние колебания подставок, послужили к тому, что указанная часть опытов Бесселя наименее обратила на себя внимание исследователей, занимающихся столь основным прибором, каков маятник. О трении в ноже говорят, но на него никто до нас не обращал должного внимания.

[1] Опытные исследования, относящиеся до выяснения величины трения ножей и до поправки времен на влияние трения уже начаты мною в Главной палате. Они составят предмет особых мемуаров. Испытывается новый (по колебаниям) способ определения твердости.

[2] Из „Выводов" Д. И. Менделеева — стр. II-126 до стр. II-130 — приводим здесь только последние 7. (*Прим. ред.*)

водорода почти в два раза менее, чем для воздуха одинаковой плотности) производит заметное влияние. Изменение плотности влияет так, что $D-1$ уменьшалось бы на 20—25% при переходе от воздуха под обыкновенным давлением (e около 1.2 мг) к пустоте ($e=0$), если бы внутреннее трение не изменялось. При уменьшении же его в 2 раза происходит в $D-1$ еще раз такое уменьшение, примерно на 20—25%.

15) Увеличение горизонтальной проекции (мидельной плоскости) взвешиваемых предметов удлиняет время t и увеличивает декремент D при прочих (для r, k, e и др.) равных условиях. Увеличение объема взвешиваемых предметов или изменение их формы, увеличивающее сопротивление (без увеличения миделя), не оказывает заметного влияния на t и, если увеличивает D, то в очень малой мере.

16) Тот вид трения, который существует (в весах, маятниках и т. п.) между острием ножа (призмы) и подставкою, на которую он опирается, несомненно влияет не только на декремент D колебаний, но и на чувствительность весов k, а также и на время t одного размаха, как видно из того, что при всех прочих тех же условиях взвешивания (как то: весы, нагрузка, r, e, положение гирьки, изменяющей расстояние центра тяжести от точки опоры, и т. п.) уменьшение твердости подушки под средним ножом весов (закаленная сталь, агат, мягкая сталь, латунь, медь, рог и твердый каучук) в наших опытах этого рода (они ныне продолжаются в Главной палате) повлекло за собою перемену в k от 0.043 до 0.193 мг, в t от 33.3 до 15.0 сек. и в D от 1 029 до 1.252.

17) Зависят ли эти изменения от округленности острия ножа или от различия в деформации (происходящей вследствие давления груза) ножа и подставки, или еще от каких-либо причин (прилипания и т. п.), во всяком случае нельзя думать, что этого нет при обычном устройстве (в весах, маятниках и т. п.) ножа и подставки из стали и агата (кварца, кремня и т. п.), а потому в определении не только декрементов, но и времен размахов явно участвует трение ножей.

18) Поэтому в определении напряжения тяжести g и длины секундного маятника должно делать поправку на трение ножа. Эта поправка должна увеличивать время одного размаха, а потому длина секундного маятника — при исключении трения ножа — должна быть короче, а g менее, чем ныне общепринято, потому что ныне на трение ножа поправки не делается.

19) Изменение декремента в большинстве случаев явно и тесно связано с изменением времен размаха, а так как перемены в декременте легко определяются, и при их изменении можно ждать перемен во временах, то при определении времен размахов всегда полезно точно определять декременты.

27 августа 1898 г.

1898. Предмет считаю очень важным и интересным. Помещен в 4[-й] ч[асти] „Временника“ и трудах съезда.

275. О колебании весов. Речь на съезде в Киеве 1898 г. (Общ[ее] собр[ание] съезда русс[ких] естеств[оиспытателей] [в Киеве]).

Временник Главной палаты мер и весов, ч. IV, 1899 г., стр. 33—45. [1]

21. О КОЛЕБАНИИ ВЕСОВ

Речь для общего собрания X Съезда русских естествоиспытателей в Киеве

(Август 1898 г.)

Мм. гг.

Предание гласит, что соответствие времен биений пульса с колебаниями церковной лампады внушило Галилею первые мысли о законах маятника и действия тяжести на тела; а оттуда, как все мы знаем, начались: новое направление в возрождении наук и расцвет опытного естествознания, нас собравшего здесь и отличающего науку древнюю от новой.

Как лампадка или маятник, у всех нас на глазах колеблются весы — этот образцовый и точнейший прибор естествоиспытателей. К изучению этих колебаний меня привела необходимость. В средине 1893 г., по высочайшему повелению, при Министерстве финансов учреждена Главная палата мер и весов и на меня было возложено управление ею с тем, чтобы с самого же начала озаботиться о возобновлении узаконенных русских прототипов мер веса и длины, так как без того нельзя приступить ни к установлению точнейшего соответствия наших мер с метрическими, а это неизбежно для приведения наших мер в согласие с международными, ни к повсеместному развитию у нас такого единообразия торговых мер и весов, какое отвечало бы требованиям времени, отличающегося вступлением нашего отечества в круг передовых и миротворно-промышленных стран света. Задача сводилась исключительно к возобновлению образца русского фунта, так как он один издавна в России отличается полною самостоятельностью и служит исходом для единиц массы и емкости, так как ведро и хлебная четверть определяются по весу вмещаемой ими воды. Меры же длины в России, по почину Петра Великого, согласованы с английскими, так как наша сажень приравнена к 7 англ. футам. Что касается до русского фунта,

[1] Этот выпуск „Временника" был помещен также в виде приложения, с сохранением пагинации, к „Ж. Р. Ф.-Х. О.", т. 31, отд. II, ч. хим., вып. 5. *(Прим. ред.)*

то по древним образцам прототип его был узаконен в 1747 г. сперва в виде бронзовой золоченой гири, хранившейся на Монетном дворе и ныне утраченной, а с 1835 г. в виде цилиндра из кованой платины, устроенного акад. Купфером по вышеупомянутому образцу и ныне хранимого в Главной палате мер и весов. Мягкость прежде приготовлявшейся чистой платины, сжимавшейся из комков лишь кованием, и ее видимая на глаз ноздреватость, равно как и то, что нигде не найдены прямые сличения платинового прототипа с предварительными бронзовыми образцами, принудили бывшего хранителя мер и весов. В. С. Глухова к тому, что ему пришлось лишь косвенным путем и неуверенно устанавливать основную русскую меру веса, пользуясь купферовским сличением русского фунта с английским. При таком положении дела прежде всего следовало установить новый образец русского фунта на точном основании существующего, с тем чтобы с ним были сличены несколько узаконенных точных копий, как это сделано было, после пожара в английском парламенте, при возобновлении английского фунта в средине этого столетия, а потом и килограмма, начальный образец которого также был изготовлен из сжатой платины, как купферовский фунт. Указанные обстоятельства, не входя в подробности сложных дел метрологии и их соответствия с монетною ценностью, во-первых, определили причину вышеупомянутого предписания о восстановлении прототипов, во-вторых, служили поводом к изготовлению нескольких копий прототипа из сплавленной и весьма твердой иридистой платины, из которой приготовлены возобновленные копии международных метрических прототипов, и, в-третьих, заставили Главную палату мер и весов прежде всего обратиться к разработке способов точнейших взвешиваний. Устройство прототипов всегда служило прямым поводом к изучению и усовершенствованию всех приемов точных измерений. Так Борда, при установлении килограмма, указал способ избегнуть неточность весов, так Эри, при восстановлении английских прототипов, нашел способы избегнуть погрешностей гнутия мер длины, так Купфер, при возобновлении русских прототипов, и Международное бюро в Бретейле, при возобновлении метра и килограмма, усовершенствовали как взвешивания, так и сличение мер длины. Потому-то возобновления прототипов всегда тянутся многие годы. Возобновление английских прототипов, уничтоженных пожаром 1832 г., длилось более 20 лет (кончено в 1855 г.) при участии большого числа первоклассных ученых Великобритании, с Эри во главе. Международная метрическая комиссия при участии знаменитейших ученых и при громадных средствах стран всего мира — в том числе и России — работала с 1872 по 1889 г., пока выпустила свои прототипы.

Так как исследования Купфера, касающиеся возобновления русских прототипов, внесли в начале 40-х годов много самостоятельно-нового, а русские успехи в точных знаниях с тех пор признаны повсюду, то достоинство нового учреждения требовало, чтобы порученное ему возобновление прототипов не только не уступало позднейшим иностранным, но и внесло свой вклад в область точных измерений. В конце прошлого столетия и в первой половине нынешнего точность отдельных сличений веса фунтовых или килограммовых гирь едва достигал до миллиграмма. Разные усовершенствования во взвешиваниях (особенно в перекладывании гирь, по способу Гаусса) и в самих весах (особенно же механическая перекладка гирь — издали) позволили уже доводить точность единичного взвешивания до десятых долей миллиграмма, что и применено при возобновлении килограммов Международным бюро в Бретейле — около Парижа, в 80-х годах. Система повторных взвешиваний давала при этом возможность низводить вероятную погрешность выводов до сотых и даже тысячных долей миллиграмма. Но оставалось еще не мало поводов для дальнейшего усовершенствования, начиная от полнейшего устранения влияния наблюдателей до более уверенного определения чувствительности. И если бы я стал описывать все то, что проделано в этом отношении в Главной палате, то надолго бы уклонился от истинного предмета своего сообщения. Скажу одно: при отдельном взвешивании килограммовых или фунтовых платино-иридовых гирь нам уже удалось уверенно определять сотые миллиграмма,[1] т. е. в текущем столетии точность взвешивания возросла по крайней мере в сто раз противу той, до которой достигал Борда и его современники в конце XVIII века. А так как все естествознание внушает мысль искать истинные и важнейшие законы в мельчайших долях — от дифференциальных частей и атомов до микроорганизмов, весящих обыкновенно менее одной миллионной доли миллиграмма, то впереди остается еще много для достижения желаемой здесь точности, как во всем океане точных знаний.

Но не только сотые и тысячные миллиграммов, даже десятые не могут определяться набором соответственных гирь, ибо таких нельзя и сделать. Для этого, равно как и для суждения о равновесии, служат в последние лет 50, начиная с Купфера, исключительно, — колебания весов. Отчетливость наблюдения этих

[1] Так, например, вновь (1894 г.) приготовленный основной платино-иридовый прототип русского фунта, обозначенный вензелем государя императора Николая II и равняющийся по весу (в пустоте) платиновому фунту 1835 г., оказывается при многократной выверке, по сравнению с международным килограммом, весящим от 409.51240 до 409.51241 граммов, с погрешностью в отдельных взвешиваниях до ± 0.00001 г. Средний вывод из системы взвешиваний, конечно, даст еще гораздо меньшую вероятную погрешность.

колебаний необходимо доводить уже до секунд дуги, если желательно судить о вышеуказанных малых — стомиллионных долях в разности веса, а потому современное точное взвешивание напоминает астрономическую степень точности, если обычное взвешивание сравнить с землемерной.

Имея прямую надобность[1] в усовершенствовании точных взвешиваний и редко встречающуюся для того возможность, соединившуюся в Главной палате мер и весов, мне казалось неизбежно необходимым, ради самих взвешиваний, обратиться к изучению колебания весов. А так как колеблющиеся весы — по существу своему — представляют маятник, то можно было надеяться, что такое изучение в некотором смысле восполнит сведения о колебании сложных маятников, и потому прямо или косвенно посодействует дальнейшему изучению действия тяжести, природа которой со времен Галилея, Ньютона и Фарадея остается сокрытою от пытливости естественной философии. Притом опытного изучения колебания весов почти не существует,[2] а точные весы, медленно колеблясь, соответствуют (по временам размахов в 30, 40, даже 60 сек.) простому маятнику длиною в 1, 2, даже 3 версты, т. е. столь длинному, что с ними нельзя произвести прямого и точного опыта. С весами же, когда все уже устроено для точнейших взвешиваний, сравнительно легко точно наблюдать законы колебаний, т. е. изменение *времен* размахов и убыль величины их амплитуд или *отклонений* (от положения равновесия) в зависимости от перемены разных условий, напр. от угла уклона, от нагрузки, от положения центра тяжести, от плотности среды, в которой совершается колебание, от внутреннего трения этой среды, от трения ножей о подставки и от других обстоятельств, которые можно изменять в опытах или которые естественно видоизменяются при наблюдениях как маятников, так и весов. Но наблюдения, касавшиеся маятников, имели всегда в виду почти исключительно времена колебаний, т. е. число их в течение средних суток, величина же размахов и их

[1] Надобность всей возможной тщательности при установлении прототипов видна из того, что они служат для выверки основных копий главному центральному учреждению, которое проверяет ими образцы для местных учреждений, эти для проверителей, сличающих уже практические меры, а для них — например для взвешивания монет в банках — часто необходима при килограммах и фунтах точность еще до миллиграмма. Число упомянутых степеней или градаций ведет к тому, что неуверенность может возрастать в сотни и тысячи раз в практической жизни, где все чаще и чаще требуется увеличенная точность. А ведь прототипы назначаются не для одной текущей, но и для предстоящей обстановки. Отчетливость мер, конечно, требуется не всегда и не во всем, но уже во многом например в опытных исследованиях, в военном оружии, в золотом обращении, при сооружениях и т. п. Случайностям — не должно оставлять здесь никакого места.

[2] Ему посвящены лишь немногие строки в трудах Тизена, Пойнтинга и некоторых других лиц, занимавшихся в последние годы точными взвешиваниями.

убыль или декремент наблюдались лишь попутно, преимущественно для поправки времен, т. е. для приведения их к бесконечно малым размахам, для которых приложим Галилеев закон пропорциональности квадрата времен размаха с длиною синхронического простого маятника. При наблюдении же колебания весов главное внимание невольно сосредоточивается именно на декременте или на убыли размахов особенно потому, что по ним судят о разности веса. Таким образом изучение колебания весов уже по существу своему должно восполнить запас сведений о колебании маятников, если единовременно и с возможною точностью наблюдать, как мы и делали, длительность времен размаха и изменение размахов, т. е. декремент или отношение двух друг за другом следующих отклонений.

В подробном, уже начатом печатанием, отчете „О возобновлении прототипов или основных образцов русских мер веса и длины", представляемом мною господину министру финансов Сергею Юлиевичу Витте, желающие найдут полное описание приборов, приемов и результатов наблюдений, равно как все численные данные, к ним относящиеся, и способы сложных расчетов, которые пришлось применять при исследованиях. Здесь же я лишь вкратце утружу ваше внимание изложением некоторых выводов, полученных при изучении колебания весов, останавливаясь притом лишь на тех наблюдениях, которых расчеты закончены, и на таких выводах, в которых получена уверенность при повторении. О нашей работе вам, мм. гг., однако, придется судить, как судят по скелету о живом организме, ничего иного сделать тут нельзя. В моем сообщении, конечно, исчезнут не только подробности, но и вся жизнь опытов с ее последовательностью. По скелету вы, быть может, воспроизведете и эту сторону дела.

Предварительно считаю необходимым сообщить:

1) Что наблюдения производились моими друзьями и сослуживцами: преимущественно Ф. П. Завадским, В. Д. Сапожниковым, а также А. Н. Доброхотовым, К. Н. Егоровым, В. А. Мюллером, О. Э. Озаровскою и Е. Ф. Эндимионовою; большинство наблюдений производилось попутно, при множестве текущих взвешиваний, необходимых при возобновлении прототипов.

2) При исследованиях применялось 10 различных весов, с наибольшею подъемною силою от 2 г до 75 кг Эртлинга (в Лондоне), Колло (Париж), Шульца (Юрьев), Рупрехта (Вена), Неметца (Вена) и Горячева (С.-Петербург), но наибольшая часть наблюдений сделана на 2-х весах, — Рупрехта и Неметца, — поднимающих до 1 кг и дающих притом возможность отсчитывать по десятым долям шкалы тысячные доли миллиграмма. Особенно много наблюдений производилось на килограммовых весах Неметца из Вены, потому что они герметически закрываются

большим стеклянным колоколом и снабжены всеми механизмами новейших систем, что дает возможность изменять атмосферу весов и после того наблюдать колебания, добавлять груз издали, переменять места навесок и т. п.

3) Многочисленные и сложные расчеты, сопряженные с наблюдениями колебания весов, все до одного, кроме меня, независимо рассчитывались одним из вышеупомянутых моих сотрудников.

4) В дальнейшем изложении я считаю для ясности полезным сопоставить наблюдения над колебанием весов с наблюдениями, производившимися с маятниками, причем могу сослаться на те, которые собраны в IV и V томах „Мемуаров", относящихся к физике (Collection de mémoires relatifs à la physique), изданных Французским физическим обществом, так как в этом полезнейшем издании собрано все важнейшее от Кондамина (1735) до Бесселя (1826 и 1849) и Стокса (1850), что необходимо для правильного понимания истории наблюдений над колебаниями сложного маятника.

Начну с наблюдений, касающихся зависимости времен размахов от угловой величины этих размахов (амплитуд) или отклонений. Известно, что Галилей (1589) считал времена[1] всех размахов данного маятника при всяких отклонениях одинаковыми, откуда и ведет начало понятие об изохронизме. Гюгенс и Ньютон, конечно, уже знали, что колебания при больших амплитудах длительнее, чем при малых, если обсуждали преимущественно циклоидный маятник. Аббат Пикар (1669) прямыми наблюдениями показал, что времена размахов уменьшаются по мере убыли амплитуд. Полная, ныне общеизвестная теория этого явления дана в „Записках Петербургской Академии Наук" лет через 60 после Пикара Бернулли (1726), который нашел и формулу для приведения времен колебания к бесконечно малым размахам, чем воспользовался впервые Боскович (1785) лет чрез 60 после мемуара Бернулли. Стало, напр., очевидным, что если размах достигнет 1°, то его длительность на одну пятидесятитысячную долю более, чем при бесконечно малых размахах. Это одна из первых поправок, вводимых в наблюдения при определении длины секундного маятника. Сомнение в точности этой поправки, сколько мне известно, возбуждал только Себейн (Sabine, 1831), но это побудило лишь к тому, что наблюдения стараются вести при самых малых отклонениях, а именно менее 1°. Точных же опытных данных, сколько известно, никто не собирал, да и приемы для определения отклонений маятника столь мало совершенны (даже у О. Мейера, 1871), что при них и нельзя надеяться на открытие точной зависимости между временами

[1] В подлиннике „время". (*Прим. ред.*)

и амплитудами,[1] так как главное внимание до сих пор обращено лишь на точность определения времен, к чему способ совпадения (Боскович) дает полную возможность.

В лучших из точных весов Главной палаты самое устройство не позволяет увеличивать углы отклонений более, чем на 1° дуги, а обыкновенно колебания наблюдаются при отклонениях менее 20—10 минут по дуге. И прямой опыт показал, что *времена размахов убывают вместе с амплитудами во много — в сотни — раз быстрее, чем можно ждать по общепринятым понятиям.* Так, напр., для одного из наблюдений на весах Неметца (по журналу № 940), когда записано 50 размахов и время каждого колебания отмечено на хронографе Марея, 5-й размах длился 38.4 сек., а 45-й только 36.8 сек., что дает разность в 1.6 сек., тогда как, судя по величинам отклонений и обычным допущениям, здесь можно было ждать уменьшения времени лишь на тысячные доли секунды. И это повторяется в сотнях несомненных данных. Убыль времен размаха весов, подобно убыли самих размахов, как показали данные, можно в первом приближении выразить своим постоянным декрементом, т. е. допустить, что времена размахов, друг за другом следующих, представляют постоянное отношение. А это допущение, при интегрировании, дает простое выражение, которое проверено над наиболее полными записями хронографа.

Этот неожиданный вывод о столь явном отступлении от изохронизма дал большой толчок к расширению исследования. Но я спешу сказать, что не думаю сомневаться в приложимости общепринятой теории простого или математического маятника — к физическим явлениям; от этого я далек, считаю, однако, полезным расширить точные сведения о колебании весов, которые уже тем отличаются от обычных форм маятников, что, например, центр тяжести здесь близок, а там далек от точки опоры, что подвески с чашками и нагрузками — сами суть маятники и т. д. А потому станем далее говорить о численных выводах опытов и наблюдений над колебаниями весов, предоставляя времени извлечь общие теоретические заключения, в которых, конечно, все прежнее будет приведено в соглашение с тем, что дают наши новые наблюдения. Так, думается мне, будет лучше, т. е. меньше ошибок и быстрее, глубже поймется самое действие тяжести, инерции, трений и всяких сопротивлений, которые действуют при колебаниях весов и всяких разновидностей сложного маятника.

---

[1] Я думаю, что при наблюдении маятников скорее бы достигли точности и согласования, если бы амплитуды определяли способом (Погендорфа) зеркального отражения и приводили бы времена колебаний не к бесконечно малым дугам, при которых нельзя делать опытную проверку, а относили бы к дугам определенного размера, напр. в $^1/_2$ градуса по обе стороны от равновесия, делая определения при дугах менее и более условными.

Колебания тухнут, уменьшаются и, умирая, приводят к равновесию. Вот где истинная физика дела, его еще мало объясненная реальность. Здесь, прежде всего, две основных задачи для опытного изучения.[1] Во-первых, надо узнать численный закон убыли размахов, не вникая в причины, потому что таким путем прежде всего охватывается вся действительность. Во-вторых, необходимо решить, постановкою соответственных опытов и измерений, насколько эта убыль размахов исчерпывается как средою, в которой происходит движение, так и трением ножа или призмы о подставки, так как два эти сопротивления, поглощая живую силу или энергию, должны вести к большей или меньшей убыли размахов. В этих отношениях сделано уже кое-что для маятников, хотя при них весь интерес сосредоточивали на временах, а не на декременте или убыли размахов, а в этой убыли, думается мне, и кроется главная задача понимания сил тяжести и притяжения, начиная от длины секундного маятника и кончая вопросом о скорости распространения тяготения. Изучение колебания такого маятника, как весы, невольно привело меня к подобным мыслям, но боюсь над этим дольше останавливаться и спешу под защиту скромных опытов, ключ к которым у истории предмета.

Опытным законом убыли размахов как у маятников, так и во множестве других случаев считается постоянство декремента,[2] чему нашли основания как в опытных данных, так в гипотезах сопротивления. А так как при постоянстве декремента разность логарифмов двух друг за другом, чрез равные промежутки, следующих размахов есть величина постоянная, то применимость правила о постоянстве декремента легко испытывается при наблюдении всяких колебаний. Многочисленные наши наблюдения над колебаниями весов всякого рода можно свести в указанном отношении к трем положениям: 1) декремент колебаний весов не есть постоянная величина, а все время убывает по мере убыли размахов, т. е. по мере приближения к равновесию; 2) относительная убыль декремента постепенно уменьшается, так что, в первом приближении, можно принять для выражения декремента линейную функцию — в зависимости от величины отклонения, а потому только разве при бесконечно малых размахах, — а их наблюдать нельзя, — можно принять декремент постоянным, и 3) всякие обстоятельства, напр. перемена нагрузки весов, качество среды, трение ножей, чувствительность и т. п.,

[1] Есть еще третья: узнать влияние иных колебаний: звуковых, световых, теплотных и т. п., и хотя я имею ее в виду, но к опытам еще не было времени приступить.

[2] Однако Стокс (1850) и за ним О. Мейер (1871) уже видели, что для маятников декремент не представляет постоянства, но эти замечания прошли, сколько мне известно, бесследно.

влияющие на изменение времен размахов, влияют единовременно и всегда на функцию декремента, особенно же на предельный декремент, так что времена колебаний теснейше связаны с декрементами. Сотни возможно точных наблюдений, в каждом из которых число записанных размахов было велико — до 126 — показывают общую приложимость вышеуказанного тем с большею достоверностью, что элементарный закон, принятый для первого приближения, чрез суммирование дает легкую возможность переводить расчет прямо на наблюдаемые отчеты шкалы, устраняя самое понятие о декрементах. Уменьшение их, повидимому, составляет совершенно общее явление, приложимое и к маятникам, как можно видеть даже из данных Борда и Бесселя, что до сих пор не принималось во внимание, так как связь между временами размахов и декрементами обыкновенно не признавалась, хотя исследования Стокса (1850) над внутренним трением и указывают на эту связь.

Таким образом опыт показал, что и время размахов и их декременты, при прочих равных условиях, т. е. в продолжение одного наблюдения, правильно уменьшаются по мере уменьшения отклонений. Поэтому, изучая влияние разных обстоятельств на колебание весов, было необходимо относить времена и декременты к какому-либо определенному отклонению, что и станем далее делать, приняв для каждых весов за норму (находимую из расчета) отклонение в 15 делений шкалы. Эта норма выбрана мною лишь условно, ради простоты расчетов и ради того, чтобы не говорить о воображаемом, т. е. о пределе или декременте при бесконечно малых размахах, каких наблюдать нельзя. Деления же шкалы каждых весов легко переводятся в углы, так как известен радиус или расстояние шкалы от оси качаний или при зеркальном отчете[1] от фокуса зрительной трубы, если шкала закреплена на трубе.

Только после вышеприведенных выводов, потребовавших уже массу наблюдений, относящихся до изменений времен и декрементов с величиною отклонений, стало возможным организовать вторую часть опытного изучения колебания весов, искусственно так видоизменяя обстоятельства, чтобы выступило влияние веса нагрузки, среды, трения и пр. на времена и декременты колебаний. Поле для опыта тут беспредельно обширно, многое у нас лишь зачато, но часть опытов уже закончена и о ней я сообщу то, что успел эмпирически вывести до сих пор, повторяя вновь, 1) что от воззрений стремлюсь воздержаться, обольщаясь мыслью, что воззрения явятся сами, если опыты поставлены соответственно делу, и 2) что в упомянутом выше отчете о возобновлении прототипов, печатаемом для представления г-ну

[1] Так как тогда читаемый угол вдвое более действительного.

министру финансов, желающие найдут все подлинные числа самих наблюдений.

Начну с влияния среды, в которой происходят колебания. Среда, как было очевидно еще Галилею и Ньютону, должна влиять на колебания; спрашивалось только: как и насколько — во времени и в декременте? Ответы на эти вопросы имеют громаднейшую литературу и, сказать правду, их еще далеко не решили, в них проглядывает свет только из данных опытов, но и то лишь по отношению к временам (но не декрементам). Для ясности последующего необходимо показать важнейшие стороны теоретических и опытных исследований для маятника, весами же не занимались.

Известно, что сопротивления мало поддаются математическому анализу. Это потому, вероятно, что здесь из опытных данных еще не удалось извлечь основных или элементарных законов. Общие положения теории, разработанной первоклассными математиками, можно выразить так: сопротивление среды не влияет на время размахов, оно только уменьшает амплитуды, т. е. рождает декремент. Но так как простой опыт, сделанный еще Ньютоном, показывает, что в воде колебания медленнее, чем в воздухе, то со времен Ньютона эту разность объясняли исключительно тем, что ускорение в среде уменьшается в такой пропорции, как вес в среде относится к весу в пустоте, откуда Борда с Кассини (1792), даже Кетэр, Араго (1818) и др. до Бесселя (1828) находили поправку для приведения к пустоте длины секундного маятника. Это составляет тем более примечательное упущение, что Дю-Бюа еще 1786 г. в своих „Principes d'Hydraulique" простыми и остроумными опытами доказал, что поправка Ньютона недостаточна, что ее надо увеличить даже для шара, по крайней мере, в полтора раза, и нашел, что причину этого должно искать в массе жидкости, колеблющейся вместе с телом маятника и изменяющейся с его формою. Бессель, не зная этого и произведя в воде и воздухе опыты с шарами и цилиндрами одинакового размера, но разной плотности, т. е. повторив то, что за 40 лет ранее сделал Дю-Бюа, нашел по опыту то же самое, хотя его выводы и иные, чем у Дю-Бюа; он свел дело на момент инерции. Но Бессель справедливо заключил, что оборотный маятник, три раза открытый Прони (1792), Боненбергером (1811) и Кетэром (1818), не будет равнобойным в пустоте, если установлен в воздухе для равенства времен качания на обоих своих ножах. Сбивчивость в отношении к влиянию среды на колебания маятника началась особенно после того, когда Себейн (1829) и Baily (1832) произвели сравнительные опыты с колебаниями всяких маятников в воздухе и разреженном (до 20—50 мм ртутного столба) пространстве, а Стокс (1850), казалось, вполне объяснил найденное в опытах

различие времен внутренним трением воздуха или вообще среды, всякое движение в которой должно сопровождаться затратой энергии на работу трения. Но блестящие теоретические исследования Максвеля, подтвержденные прямыми опытами Кундта и др. физиков, несомненно показали, что внутреннее трение газов не зависит от перемены давления, по крайней мере в тех пределах, до которых достигали Себейн и Бэли. Выходит поэтому, что не одним внутренним трением воздуха, а также его массою, принимающею участие в колебаниях, как думали Дю-Бюа, Эри и др., и вообще совокупностью иных влияний, подразумеваемых всегда под сопротивлением среды, должно объяснять то уменьшение времени размахов, которое наблюдается при разрежении воздушной среды в 10—30 раз, какое было в опытах Себейна и Бэли. Следовательно, в области влияния среды на колебания еще много, много места для будущих исследований. Поэтому-то при изучении колебания весов мне казалось полезным собрать хотя не многочисленные, но возможно точные наблюдения. Для этой цели прежде всего сделано было несколько прямых наблюдений в воздухе под уменьшенным давлением, когда плотность воздуха была почти в 12 раз менее обычной. В этих условиях внутреннее трение воздуха, без сомнения, сохранялось, а прямое сопротивление, зависящее от плотности, значительно уменьшалось. Оказалось, что времена размахов (каждый раз при определенной их величине) при разрежении если и убавлялись, то лишь почти в пределе возможных погрешностей. Зато декременты, т. е. убыли размахов, ясно уменьшались, как и можно было ожидать. Совершенно то же, судя по четырем рядам наблюдений, происходит в атмосфере водорода—под обыкновенным давлением, когда плотность уменьшается в 14.4 раза: время остается почти то же, а декремент — при данной величине размаха — значительно падает: вместо 1.033 в воздухе, он становится в водороде = 1.023. Малое изменение при этом времени размаха тем важнее, что внутреннее трение водорода, как ныне хорошо известно, в два почти раза менее, чем у воздуха. А так как при разрежении воздуха декремент так же падает, как при замене воздуха водородом, то можно даже считать влияние внутреннего трения и на декремент очень малым, не говоря уже о времени размахов. Плотность же среды явно влияет на декремент, а на время лишь ничтожно мало.[1]

Чтобы сократить изложение, не останавливаюсь над влиянием чувствительности весов, объема взвешиваемого предмета и его

[1] Последнее можно заключить и из опытов Себейна над маятником Кетэра. Он дал в воздухе под обыкновенным давлением 86.304—86.306 колебаний в сутки, в водороде под тем же давлением 86.314—86.315 колебаний, а в разреженном (до 91 мм) воздухе 86.313 колебаний, т. е. почти то же, что в водороде, хотя в нем внутреннее трение уменьшилось.

горизонтальной проекции на время и особенно на декремент, что указано исследованием, и обращусь прямо к опытам, сделанным для выяснения влияния трения ножей или призм. Пропущу также и то, что сделано в отношении трения призмы для маятников, потому что опытов тут мало, а теоретических познаний и того меньше, и лишь упомяну о том, что Лаплас и Бессель отчасти выяснили возможность влияния на времена колебаний закругленности ребра призмы, сводя давление ребра призмы на катание его по плоскости подставки.[1] Сообщу о трех рядах исследований, примененных нами до сих пор для выяснения трения ножей в весах: во-первых, определялось влияние перемены нагрузки, ибо трение всегда возрастает от давления; во-вторых, снятием подвесок устранялось трение двух боковых призм и, в-третьих, коэффициент трения среднего ножа изменялся, сменяя качество подушки или подставки под этим ножом весов. Все три убеждают в большом влиянии трения ножей, хотя первые два приема наиболее сложны, так как при перемене нагрузки изгиб коромысла изменяется, а потому изменяется положение центра тяжести и чувствительность, с уменьшением которой время и декремент естественно изменяются. Но опыты с переменой груза были неизбежно необходимы для самого изучения весов. В отношении влияния нагрузки наблюдения велись на 6 различных весах, поднимающих от 1 до 75 кг, так как только для подобных весов можно было ждать ясного ответа, потому что только для них вес нагрузки может превосходить вес коромысла и чашек. В каждых весах при данной нагрузке (от нулевой до максимальной), изменявшейся по крайней мере 3—4 раза, определялись все элементы: чувствительность, время размаха (при условном отклонении) и декремент, чтобы вывести эмпирическую зависимость этих элементов от перемены давления всей колеблющейся массы. И хотя мы брали не только наши точнейшие весы, но и более грубые, сходные с теми, какие применяются в торговле, но, производя наблюдения с должною тщательностью, всегда получали правильное и последовательное изменение всех элементов, легко поддающихся эмпирической законности. Замечу, однако, с самого начала, с возрастанием нагрузки — чувствительность (т. е. число делений шкалы, отвечающее данному перевесу, напр. 1 мг на одной из чашек) всегда уменьшалась[2] — конечно прежде всего от гнутия коромысла,

[1] Катящееся трение, как и скользящее, еще по опытам Кулона, одинаково возрастает пропорционально давлению, а поэтому здесь дело не в природе (или виде) трения, а только в форме острия. Очевидно, что коэффициент трения призмы (ножа) о подставку (подушку) можно определить лишь по „углу трения", зная давление и угол ножа в подушке. Опыты, сюда относящиеся, я еще не считаю возможным сообщить здесь.

[2] Но это уменьшение чувствительности — или, что все равно, увеличение k, т. е. числа миллиграммов (или их долей), соответствующих одному делению

так как от возрастания нагрузки и изгиба центр тяжести колеблющегося коромысла понижается. Но нас интересовал не этот элемент колебания, а перемена времен и декремента с нагрузкою, так как с увеличением груза инерция колеблющейся массы возрастает, и спрашивалось, как будет изменяться трение ножей при изменении надавливания, т. е. напр., будет ли с возрастанием нагрузки декремент возрастать (от увеличения работы трения) или уменьшаться (от возрастания инерции)? Опыт дал ответ, какого, признаюсь, ожидать было трудно. В точнейших весах Рупрехта, поднимающих до 1 кг с нагрузкою, — и декремент, и время размаха возрастают, в весах же Колло, поднимающих до 40 кг, с возрастанием нагрузки и время, и декремент уменьшаются, а в весах Неметца, поднимающих до 1 кг и почти столь же точных, как весы Рупрехта, с нагрузкой время размаха возрастает, а декремент сперва возрастает, а потом падает. Весы Горячева — до 2 пуд. и весы Эртлинга — до 2 кг, относятся как упомянутые выше весы Рупрехта. Хотя я полагаю, что указанные разности зависят от относительного положения ножей, но решаюсь ограничить свое сообщение только общим эмпирическим выводом, воздерживаясь от всяких объяснений, которыми не хочу и рисковать, пока не проверю их новою постановкою опытов. Примеров на это много даже в более важных предметах: Ньютон ждал много лет, пока решился отождествить тяжесть с силою, удерживающею луну около земли.

Поэтому пойдем далее в сообщении лишь эмпирических выводов из собранных нами разнородных и многочисленных наблюдений, в надежде, что правильные объяснения и дальнейшие обобщения, касающиеся тяжести и инерции, действующих и здесь — в весах, придут современем и видимое сделают умственно очевидным.

Эмпирическая правильность изменения времени и декрементов в зависимости от нагрузки сводится в первом приближении к гиперболе, иногда, напр. для весов Колло, очень точно выражающей опыт,[1] что дает некоторое право эксполировать, т. е. узнавать, каковы были бы элементы колебаний, когда бы общий груз был более или менее того, который применялся при опытах. Так, для весов Колло можно предвидеть, что время и декремент возрастут еще более, чем при нулевой нагрузке, если чашки

шкалы при добавке на одну чашку весов одного миллиграмма, — очень неодинаково для разных весов и не всегда пропорционально давлению (общему грузу). Так, для весов Рупрехта, поднимающих до 1 кг, при возрастании общего груза (давления) почти в 3 раза — k возросло только на $^1/_8$, а для весов Неметца увеличилось почти в 3 раза, для весов же Колло — почти в 11 раз. Все эти отношения очень характерны для весов разного устройства.

[1] Для этих весов асимптотою декрементам служит единица, т. е. если бы нагрузка была бесконечно великою, то не было бы убыли размахов.

снять. В действительности же время и декремент убавились, когда чашки (с подвесками) были сняты с этих весов. Не входя в подробности, скажу прямо, что и всегда снятие чашек не отвечает простой убыли нагрузки, и это не только потому, что часть сопротивлений среды убавляется при снятии чашек, но главное потому, что трение остается лишь на одном среднем ноже, а при подвешенных чашках оно действует и на боковых ножах, поглощая часть энергии колебаний. Все это показывает, что трение во всяком случае влияет не только на декремент, но и на времена размахов, а следовательно косвенно влияет на длину секундного маятника, что до сих пор не принимается в расчет, хотя без трения нельзя сделать физического маятника.

В участии трения во временах размахов убеждают нас и прямые опыты с переменными подушками или подкладками под средним ножом, на котором колеблется все коромысло. Для этих опытов служили весы Неметца, где средний нож из кремня, а агатовую подушку, на которую он опирается, легко заменить любою иною. В этих опытах все прочее (напр. нагрузка, положение центра тяжести и т. п.) оставалось без изменения и следовательно перемены чувствительности, времен размахов и декремента происходили под влиянием того трения, которое должно играть свою роль в этом, как и во всяком маятнике, конечно кроме идеального или математического.

Наблюдения велись с подушками различной твердости и упругости, а именно из агата, из закаленной стали, из мягкого вольфрамистого железа, латуни, красной меди, слоновой кости, бычачьего рога и из твердого каучука. Наблюдений нельзя было произвести ни на олове, ни на целлюлоиде, потому что в них нож, хотя и легко, но явно врезался и качания тотчас прекращались, тогда как на 8 указанных подкладках они совершались и не оставляли никакого видимого следа, хотя при нагрузке каждой чашки в 1 фунт общий вес колеблющейся массы достигает 2178 г.

Из этих опытов, поверявшихся повторением, несомненно следует, что по мере уменьшения твердости подушки — а выше они и перечислены по уменьшающей твердости, во-первых, чувствительность сильно уменьшается (в $4^1/_2$ раза — при переходе от агата и стали к твердому каучуку), во-вторых, время одного размаха также уменьшается (в $2^1/_4$ раза при указанном переходе) и, в-третьих, декремент сильно возрастает (от 1.03 до 1.25 при переходе от агата к твердому каучуку). Это последнее возрастание декремента идет в разрез с уменьшением чувствительности, так как при той же нагрузке, если в весах Неметца искусственно переменить центр тяжести и чувствительность весов уменьшить, то уменьшается не только время размахов, но и декремент. Здесь же он не уменьшился, а увеличился. Всего же разительнее то, что время размаха — при всех прочих равных обстоятельствах,

т. е. при том же положении центра тяжести, при той же нагрузке и при тех же сопротивлениях среды, изменялось и очень сильно; а именно вместо 33 сек. — на агате или закаленной стали, — на меди такой же размах длился 25 сек., на роге 18 сек., а на твердом каучуке только 15 сек. Отсюда эмпирически очевидно, что времена размахов очень явно зависят у весов от трения ножей. Нельзя думать, что то же самое не повторяется у маятников.[1] А насколько время зависит от трения, и происходит ли это от округленности острия, или от вдавливания[2] подушки и сжатия ножа, от сцепления ли (прилипания), или от перемены угла между гранями ножа и плоскостью подушки, — решить это можно лишь потом, когда числа, наблюдения и опыты станут возрастать, ибо я думаю, что в области трения — наши сведения очень бедны. Поэтому без дальнейших выводов и даже без намека на окончание работы позвольте мне, мм. гг., закончить свое сообщение об опытных данных, собранных в Главной палате над зависимостью колебаний весов от углов отклонения, от сопротивления среды и от трения. Выяснив немногое, они оставляют еще много неизвестного для будущих усилий. Колебание весов, как и маятников, производится тяжестью и инерциею. Да принесет близкий уже новый век новое расширение познаний о таинстве этих первообразов вечных сил природы, чего ждать можно только от умножения и разнообразия точных наблюдений над явлениями, ими определяемыми, а также над трением и другими сопротивлениями, действующими часто рядом с инерциею и тяжестью. Это будет завершением дел Галилея и Ньютона.

---

[1] У Бесселя есть на это и опытные данные для сравнения агата с латунью, но у него разность времен получилась лишь в долях процента.

[2] Вообще деформирования.

1899. Это стоило мне много труда и неприятностей после того. См. № 395.

354. Уральская желез[оделательная] промышленность в 1899 г. По отчетам о поездке. Редакт[ировал] Д. Менделеев. 1900.

Уральская железная промышленность в 1899 г., по отчетам о поездке, совершенной С. Вуколовым, К. Егоровым, П. Земятченским и Д. Менделеевым, по поручению министра финансов С. Ю. Витте. Редактировал Д. Менделеев. СПб., 1900 г., Часть третья. Исследования, произведенные при поездке на Урал в 1899 г., и заключительные замечания Д. Менделеева, стр. 55—58.

Глава вторая

МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ, ПРОИЗВЕДЕННЫЕ ПРИ ПОЕЗДКЕ НА УРАЛ в 1899 г.

Заключительные замечания Д. Менделеева

Много внимания обратившие на себя наблюдения над магнитными аномалиями, замеченными в Курской губернии, а особенно неоправдавшиеся надежды встретить в тех местах обильные руды железа, вновь направили искателей на выяснение того пути, который с давних пор (особенно шведами) применяется при разведках на месторождения железных руд, а именно на пользование магнитною стрелкою, как указателем их присутствия. Но, сколько мне известно, до сих пор далеко нет еще здесь достаточно полного запаса познаний в отношении к соответствию между величинами магнитных аномалий, количествами руд, их качеством, глубиною залегания, скоплением или рассеянием железных руд и т. п.; действуют лишь ощупью, руководясь только теми соображениями, что руды железа должны влиять на положение магнитной стрелки в природе, если они действуют на магнит в лаборатории. Однако, принимая во внимание хотя бы то обстоятельство, что на железных судах устраняют девиацию или влияние массы железа на компас при помощи известного распределения других магнитов, можно уже полагать, что одно распределение или относительное положение магнитных руд в недрах земли может нарушить все явление до того, что большие массы руды могут оказывать малое влияние на стрелку, и наоборот, малые, рассеянные и отдаленные рудные массы будут влиять очень сильно. Теория предмета разобрана еще в 1877 г. известным упсальским физиком Таленом в „Sur la recherche des mines de fer à l'aide de mesures magnétiques" par

R. Thalén (Nova Acta Reg. Soc. Upsal., Ser. III), а из русских ученых проф. Пильчиковым (О магнитных аномалиях. Харьков, 1888 г.), разбиралась Рюккером и др., но предмет настолько сложен, что в нем еще и поныне не наступило полного уяснения, что зависит, без сомнения, от недостаточности наблюдений в разных местах и обстоятельствах. По этой причине, отправляясь на Урал с моими сотрудниками, я считал полезным произвести несколько возможно точных магнитных измерений в местностях, заведомо богатых железными рудами, чтобы наблюдениями этого рода доставить материал для дальнейшего обследования вопроса о связи между местонахождениями железных руд и магнитными аномалиями, как в склонении и наклонении, так и в напряжении магнетизма. Ближайшим поводом к сему служило то обстоятельство, что в Главной палате мер и весов, которою я имею честь заведывать, ко времени нашего отъезда на Урал случайно оказался только-что полученный от Шасселона (в Париже) превосходный, полный походный магнитомер системы Маскара, приготовлявшийся, но не отправленный, для несостоявшейся полярной экспедиции, одно время предполагавшейся при участии моем и Ф. И. Блумбаха, расстроившейся по особым обстоятельствам. Прибор был изучен Ф. И. Блумбахом, инспектором Главной палаты мер и весов, оказался с отличными качествами и представлял все удобства для быстрых наблюдений, которые одни и могли бы быть произведены при нашей поездке. Для наблюдений заранее назначалось 4 места на Урале: горы Благодать (около Кушвы), Высокая (около Нижне-Тагильска) и Магнитная (южнее Верхне-Уральска) и Бакальский рудник. Все они заведомо содержат богатые месторождения железных руд, но три первые заключают магнитный железняк, а в Бакалах — бурый железняк. А так как магнитные свойства этих двух сортов руды, как известно, значительно разнятся (магнитный железняк составляет естественный магнит), то мне казалось очень интересным узнать, не отразится ли это различие на местных магнитных аномалиях в одном из элементов, особенно в напряжении магнетизма, определяемом по временам колебания магнита.[1] Если в аномалиях оказалось бы различие, можно было бы надеяться, при накоплении данных, на возможность по местным аномалиям до некоторой степени судить даже о составе руд, производящих аномалии. С другой стороны, три избранных пункта с магнитною рудою (Благодать, Высокая и Магнитная горы) явно отличаются между собою количественным запасом магнитной руды; а именно, в горе Магнитной его, заведомо,

[1] Было бы особенно интересно в то же время наблюдать и колебания мягкого железа или астатического магнита, но организовать подобные наблюдения я не успел пред отъездом.

более, чем в остальных двух, а на горе Высокой видимость (полных разведок не сделано) указывает на бо́льшие запасы, чем на Благодати, где подробные разведки показали до 800 млн. пуд. руды. Назначая наблюдения во всех этих трех пунктах, я имел в виду собрать материалы для суждения о влиянии количества руд — на местные аномалии, если таковая зависимость скажется в числах.

Как в этих магнитных горах, так и на Бакальском руднике железные руды лежат прямо на поверхности и разрабатываются разносами, как и большинство Уральских железных рудников. Тут руда видима, выступает наружу, ее и находят обыкновенно крестьяне; измерение магнитных аномалий здесь может прибавить лишь немногое (напр. простирание вглубь). Изучение же их, после тщательной обработки и собрания разносторонних данных, может быть особенно важным в тех, вероятно немалочисленных на Урале, случаях, когда руда не выступает на земную поверхность, скрыта в недрах и невидима глазу. Организуя наблюдения над аномалиями в заведомо богатых месторождениях, я имел в виду доставить материалы именно для возможности суждения о таких сокрытых железных рудах. Дело здесь в том, что богатейшие железные руды в среднем Урале лежат на восточном склоне и на юге, западный же склон гор, даже около Шайтанского и Билимбаевского заводов, не богат рудами, должен подвозить их или с восточного склона, или с богатых месторождений юга Урала. Поэтому вопрос об открытии новых рудных залежей железа, невидимых с поверхности, имеет свое значение — для удешевления железа — даже на Урале, хотя он обладает неисчерпаемым запасом уже известных месторождений превосходнейших руд. В этом то смысле мне и желательно было собрать, при нашей поездке, некоторые материалы в надежде, что они могут помочь появлению более обширных и систематизированных наблюдений, для которых, конечно, нужны усилия более значительные и в длинный период времени. Мне кажется, что ядро дела уже существует на Урале в виде постоянной метеорологической и магнитной обсерватории, давно существующей в Екатеринбурге. То, что я узнал (см. часть I, отчет о моем пребывании в Екатеринбурге) про эту обсерваторию (а именно: существование в ней самой явных аномалий и ничтожный оклад, в 200 р. в год, на приобретение „книг и приборов“) указало мне, с одной стороны, что желание и, если так можно выразиться, личные ресурсы, необходимые для широкого развития по Уралу систематических магнитных наблюдений, существуют, но средств денежных, а потому и фактических определений систематического свойства совершенно нет. Упоминая об этом, я имел в виду указать на пробел, восполнить который предстоит министерству земледелия и государственных

имуществ, ибо оно ведает не только магнитными обсерваториями, но и тем горным ведомством, которому во всем мире принадлежит первая роль в деле обследования рудных месторождений. Если наши попытки умножить число возможно точных и полных магнитных наблюдений на Урале не принесут ничего другого, кроме того, что обратят внимание на практическую пользу, могущую проистечь от организации систематических и полных магнитных наблюдений в Уральском крае, особенно на западном склоне гор, где руд маловато, то я буду считать не напрасным и усилия свои и моих сотрудников в этом деле: Ф. И. Блумбаха, К. Н. Егорова и С. П. Вуколова. Первый из них описывает далее самый прибор, еще не описанный в русской специальной литературе, и делает расчеты из наблюдений, производившихся на Благодати и на Высокой одним К. Н. Егоровым, а на Магнитной и в Бакалах К. Н. Егоровым и С. П. Вуколовым. Когда первый из них ездил в Экибазтус на каменноугольные копи, он взял с собою магнитомер и сделал с ним полные определения, составившие непредвиденное вначале дополнение, тем более ценное, что в тех местах по сих пор сделано очень мало магнитных измерений, и еще потому, что недалеко от мощных залежей каменного угля в Экибазтусе нашлись и железные (равно как и медные) руды.

В отношении к самим наблюдениям на данном месте я считал возможным — по быстроте, с которою должна была происходить вся поездка, — ограничиться определениями на трех пунктах, расположенных в виду друг друга и в разных сторонах от видимого центра залежи, а если возможно, то и вблизи этого центра. Если аномалий нет — склонение и наклонение останутся те же на всех трех пунктах, если аномалии явны — они будут различны. Взаимное отношение пунктов наблюдения предположено определять или по азимуту солнца — когда оно не заслонено облаками, или по измерению азимута на один видимый предмет, а по плану местности определять примерное расстояние пунктов наблюдения. Зная, что расстояния не было времени измерять самому наблюдателю, я рекомендовал довольствоваться планами местности; они были легко получены на г. Благодати и на г. Высокой, но на г. Магнитной, на Банковском руднике и в Экибазтусе планы не были получены (их обещали прислать, но до сих пор они не получены), а потому пришлось ограничиться глазомерным определением расстояний, что может оказать некоторое влияние только на погрешность определения склонения, в наклонении же и напряжении не может. Конечно, если бы было более времени, наблюдения были бы повторены большее число раз и все расстояния были бы лично измерены, но и в том виде, каким пришлось по необходимости ограничиться, наблюдения дают все главные элементы

с достаточною степенью точности для таких первичных рекогносцировок, какие только и имелось в виду получить при поездке.

Делать выводы или заключения о наблюденных аномалиях не только рановременно (необходимо много других данных, хотя бы и подобных нашим), но и не нужно с своей стороны, потому что все возможное извлек из наблюдений Ф. И. Блумбах в своих выводах, следующих за его историческими замечаниями и за расчетом наблюдений, произведенных К. Н. Егоровым и С. П. Вуколовым.

Но считаю неизлишним прибавить с своей стороны, что для открытия в данной местности явной (или крупной) магнитной аномалии можно обойтись и самыми обычными, всюду имеющимися землемерными (угломерными) приборами, снабженными магнитною стрелкою (вроде астролябии). Для этого можно применить два способа наблюдений: треугольников или прямых линий, означенных вехами. Если есть местная аномалия, то в треугольнике (надлежащего размера, не очень малого и не очень большого) сумма трех углов, определяемых по отклонению магнитной стрелки, не будет равна 180°, если центр местного магнитного притяжения будет вблизи (или внутри) измеряемого треугольника. Можно также просто означить вехами прямую линию (в несколько верст длиною) в исследуемой местности и на многих точках этой линии определять по стрелке угломерного прибора угол отклонения: если аномалии нет, отклонение по всей линии будет то же самое, а если аномалии — присутствие руды означающие — существуют, то получатся на протяжении линии неодинаковые показания стрелки, и разность будет тем больше, чем ближе проходит линия к центру аномалии. Изменяя положение линий и треугольников, можно найти в данной местности и самое положение центра аномалии. Полагаю, с своей стороны, что жителям Урала измерения подобного рода могут показать много местностей, богатых железною рудою, не выступающею на поверхность земли. Особенно важны подобные наблюдения на западном склоне Урала, где руд мало. Но, конечно, систематические наблюдения, произведенные точными приборами, дадут указания более верные, и я думаю, что время пришло обследовать весь Урал в этом отношении. Крестьяне открыли, правда, уже много руд, вышедших на поверхность земли, а магнитные измерения откроют и то, что спрятано в глубине. Шведские рудокопы — давно пользуются магнитными определениями для отыскания руд железа. Пора приняться за это дело и на Урале с помощью точных современных приборов и способных к тому просвещенных горных инженеров.

23 ноября 1899 г.

Временник Главной палаты мер и весов, ч. 8. 1907 г.

69. ПОДГОТОВКА К ОПРЕДЕЛЕНИЮ АБСОЛЮТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ТЯЖЕСТИ В ГЛАВНОЙ ПАЛАТЕ МЕР И ВЕСОВ ПРИ ПОМОЩИ ДЛИННОГО МАЯТНИКА С ЗОЛОТЫМ ШАРОМ

Между разнородными измерительными (метрологическими) исследованиями, для разработки которых учреждена в 1893 г. Главная палата мер и весов, определение величины напряжения тяжести, судя по множеству работ, посвященных этому предмету, не только занимает важное место, но и представляет до сих пор множество такого рода затруднений, которые не дают возможности достигать в этих определениях той степени точности, какая свойственна уже большому числу измерений, произведенных за последние десятилетия. Это относится преимущественно до абсолютного определения величины напряжения тяжести, ибо при определении относительного напряжения (на разных местах земной поверхности и на разных высотах) степень точности, достигаемой последними исследователями, не оставляет пока желать чего-либо еще большего. Одною из целей, имевшихся в виду при самом учреждении Главной палаты, служила потребность в новом определении местного напряжения тяжести, потому что при многих точных измерениях, производимых в Палате, требуется точное знание напряжения тяжести, а сведения об этом предмете представляют не мало сомнительного, как можно судить уже по сводной таблице (стр. 38 предисловия к тому IV), помещенной Вольфом в поучительнейшем собрании мемуаров, относящихся к физике, издаваемых Французским физическим обществом (Collection des Mémoires relatifs à la Physique, publiés par la Société française de Physique, Tomes IV et V, Mémoires sur le pendule. Gauthier-Villars, 1889 et 1891). Из указанной таблицы видно, что для длины секундного маятника на уровне моря при 45° сев. географической широты встречаются даже в последнее время разности, достигающие нескольких десятых долей миллиметра, а так как погрешности в определении длины секундного маятника почти в 10 раз менее погрешностей в напряжении тяжести, то в этой последней неуверенность в точности достигает уже до миллиметров. Это определяется множе-

ством разных обстоятельств, препятствующих достижению желаемой точности в определении длины секундного маятника или вообще длин маятников, имеющих определенное время колебания, которые далее рассматриваются, а также тем обстоятельством, что не только соседство больших масс воды, напр. морей, или близость горных кряжей, но и подземное сложение почвы оказывают несомненное влияние на величину напряжения тяжести в данном месте, что принуждает для получения точных данных прибегать к измерению напряжения тяжести в каждом месте, где ведутся самостоятельные метрологические исследования. Для большинства измерительных работ совершенно достаточно относительное определение напряжения тяжести по сравнению с такими местами, где произведены другие основные метрологические исследования, напр. по отношению к Парижской астрономической обсерватории, к Международному бюро, к Гринвичской обсерватории и к Берлину. Такое относительное определение напряжения тяжести для Главной палаты произведено было в 1903 г. при поездке Ф. И. Блумбахом и мною для связи Главной палаты с Парижской обсерваторией, Бретейлем и Берлином. Но общий недостаток точности в абсолютной величине напряжения тяжести побуждает Главную палату предпринять труд абсолютного определения напряжения тяжести в надежде усовершенствовать сведения и приемы об этом важном предмете, занимающем умы ученых со времен Галилея и Ньютона. Возможность преодолеть предстоящие здесь трудности определяется тем, что в нашем учреждении, кажется, впервые соединены условия для точного определения длин, масс и времени, что именно и требуется при точном определении напряжения тяжести.

На основании сказанного, в Главной палате мер и весов предположено произвести новое, возможно точное, определение абсолютного напряжения тяжести в ближайшее время, и предлагаемая статья составляет очерк или программу тех соображений и приемов, которые предположено положить в основание предстоящего исследования. При его выполнении по указанию действительности и вследствие уже обещанного участия многих специалистов, особенно же моих сотрудников по Главной палате: Ф. И. Блумбаха, А. Н. Доброхотова, Ф. П. Завадского, М. В. Иванова, А. А. Иванова, А. М. Кремлева, О. Э. Озаровской и В. Д. Сапожникова, вероятно будут введены дальнейшие усовершенствования в излагаемых далее приемах, но я считаю не излишним ныне же предварительно изложить имеющиеся предположения; надеюсь, что другие специалисты присоветуют еще новые способы для достижения всей возможной степени точности в сложных исследованиях, предстоящих Главной палате в указанном отношении, и с своей стороны буду признателен

за всякие полезные указания, которые постараюсь принять во внимание. Однако прежде чем приступить к изложению своих соображений, считаю долгом высказать здесь глубочайшую благодарность его высокопревосходительству г. министру финансов Владимиру Николаевичу Коковцову за то внимание, с каким он отнесся к проекту нового определения абсолютного напряжения тяжести при Главной палате, что и выразил наглядно в разрешении воспользоваться для указанной цели запасами золота на Монетном дворе, разрешив приготовить из этого запаса золотой шар весом около 50 кг или 3 пудов, а это даст возможность придать нашим определениям такие размеры, какие еще не применялись для этой цели до сих пор. При такой поддержке, какая оказана со стороны г. министра финансов, и при тех научных пособиях, какие имеются в Главной палате, можно надеяться на преодоление части трудностей, предстоящих при новом возможно точном определении напряжений тяжести.

§ 1. **Длинные маятники.** При обсуждении способов для нового возможно точного определения абсолютной величины напряжения тяжести прежде всего должно было остановить внимание на длине маятника, так как ею определяются времена качания. Небольшие длины, от 1 до 4 м, до сих пор применявшиеся для сей цели, избирались не только ради удобств и точности сравнения таких длин с выверенными прототипами длины, каковы: туаз (=1.94904 м), ярд (=0.914400 м) и метр, но и потому, что весь прибор следовало помещать в замкнутое пространство (для избежания возмущения от движений воздуха) с неподвижною опорою наверху для подвешивания маятника, а в обычных условиях обсерваторий и лабораторий, где производились определения, это достижимо только при очень ограниченных высотах или длинах маятников. Если не раз производились наблюдения над качаниями маятника в высоких помещениях, напр. под куполами церквей или на лестницах многоэтажных зданий (так О. Е. Мейер, 1871 г., производил наблюдения на лестнице Бреславского университета), то при этом обыкновенно преследовались иные цели, напр. зависимость времени колебаний от угла уклона, закон убыли колебаний, сохранение плоскости качания при суточном вращении земли (маятник Фуко) и т. п., при определениях же напряжения тяжести или длины секундного маятника до сих пор пользовались лишь сравнительно короткими маятниками, особенно же после изобретения (Прони в 1800 г. и Боненбергером в 1811 г.—в проекте, а Кэтером в 1817 г.—на опыте) оборотного маятника, долженствующего представлять негибкую твердую массу, в которой закрепляются два друг к другу обращенные остриями ножа (призмы) на таком расстоянии, чтобы качания на каждом из них совершались в одинаковые времена; негибкие же или твердые маятники, очевидно, неудобно

было брать иными, как сравнительно малых размеров. Обыкновенно ныне длина, или расстояние ножей (или острых граней призм), в оборотных маятниках близка к 1 метру. А между тем при употреблении коротких маятников, и особенно стержневых и оборотных, качающихся на ножах или призмах, с одной стороны, принципиально и явно удаляются от той идеальной формы „математического" маятника, с которой начинается вся история этого предмета и к которой относится почти вся его теоретическая обработка, а с другой стороны, ножами или призмами вводится много новых затруднений или сомнительностей. Они основываются на способности ножей тупиться и скользить по подставке, что не раз уже доказано и что приводит к необходимости перемещать ножи в оборотных маятниках, а это усложняет прибор и приемы наблюдений. Главным же недостатком коротких маятников я считаю значительность в них относительного значения несомненно существующего трения между ножом и подставкою, от чего, по всей вероятности, изменяется и время колебания,[1] а этого до ныне в расчет не принималось.

[1] Вопрос о влиянии трения ножа на время колебания маятника давно и многократно поднимался, и обыкновенно признают, что трение в этом случае явно служит к уменьшению величины размахов, т. е. влияет на декремент (убыль) колебаний, но на их длительность влияния не оказывает. При своих исследованиях колебания весов в 1897 и 1898 гг. (см. мою статью: „Опытное исследование колебания весов", явившуюся в печати в 1898 г. и извлеченную в „Proceedings of Royal Society of London", vol. 63, p. 454 и в статье 3-го выпуска „Временника Главной палаты") для испытания предмета, ничего не изменяя в весах, переменялась только опорная подставка под средней призмой — чтобы изменить трение ножа, около острого ребра коего происходят колебания. Оказалось на опыте, на разных весах, что при увеличении трения не только возрастает убыль размахов (декремент), но и время одного размаха изменяется, а именно убывает, притом очень сильно, как видно из следующего сопоставления.

	Призма опирается на подставку из			
	агата	латуни	красной меди	твердого каучука
Декремент	1.032	1.034	1.065	1.252
Время одного размаха	31.5 сек.	27.8 сек.	25.4 сек.	15.0 сек.

Из того, что с увеличением трения призмы коромысла весов колеблются скорее (а не медленнее, как можно, пожалуй, ожидать), мне кажется, можно с большой вероятностию сделать два заключения: 1) трение призмы о подставку в весах во всяком случае (т. е. при самой твердой подставке) участвует в определении времен колебания весового коромысла и 2) такое же участие трения острия призмы о подставку в определении времен колебания должно существовать и для маятников. Для проверки этих заключений предположены мною два ряда особых наблюдений в Главной палате: отчасти с весами, отчасти с маятниками. Если, например, взять трубчатый оборотный маятник и довести чрез перестановку добавочного груза, при данном расстоянии призм, времена колебания на обеих призмах до полного равенства, а затем, не изменяя

В пользу применения для определения напряжения тяжести длинных маятников, — кроме того, что путь этот еще не испытан, — говорят и многие другие соображения (напр. увеличение времени одного размаха, возможность точных наблюдений времени при малых углах уклонения и т. п.), но более всего возможность увеличения точности в определении напряжения тяжести g, так как после введения надлежащих поправок, т. е. после нахождения по наблюдаемой длине маятника расстояния центра качания от точки опоры или длины синхронического математического маятника и после всех поправок на время:

$$g = \pi^2 l t^{-2}, \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

где чрез g означено напряжение тяжести (в метрах на секунду), чрез l означена исправленная длина маятника (в метрах) и чрез t время (в секундах) одного размаха, а означая чрез $\Delta(g)$, $\Delta(l)$ и $\Delta(t)$ погрешности соответственных величин, имеем после дифференцирования и после исключения t, что:

$$\pm\Delta(g) = \pm g l^{-1}\Delta(l) \mp 2\pi^{-1} g^{\frac{3}{2}} l^{-\frac{1}{2}}\Delta(t) \quad \ldots\ldots (2)$$

Так как l входит в отрицательной степени (т. е. в делитель), то из формулы видно, что чем более велика длина маятника,

---

расстояния призм, увеличить в несколько раз вес маятника, введя внутрь его надлежащий груз, притом сохраняя прежнее положение центра тяжести и производя наблюдения в сильно разреженном пространстве, по возможности при тех же прочих условиях (температуры, величины размахов и проч.), то, опять доведя времена колебания на обеих призмах до равенства, опыт должен прямо ответить на вопросы: влияет и на сколько или вовсе не влияет трение на времена колебания? Если организация такого сложного и деликатного (ибо, вероятно, влияние трения на времена очень невелико) опыта удастся, то можно будет даже судить довольно точно о мере влияния трения на времена колебаний. Предварительные или, так сказать, разведочные наблюдения — в воздухе и вообще в условиях, лишь приближающихся к необходимым для точного ответа, начаты в Главной палате О. Э. Озаровскою и Е. В. Разумихиною, при содействии А. И. Григорьева, но и они требуют очень много времени для выполнения, а оно у лиц, служащих в нашем учреждении, часто должно быть отдаваемо многим другим обязанностям, возложенным на немногочисленный персонал Главной палаты мер и весов. При предпринимаемом определении напряжения тяжести, говоря вообще, открывается множество задач интереснейшего свойства, и если я касаюсь некоторых из них, то имею в виду не столько излагать программу предначертанного (тем более, что она, наверно, с началом опытов еще возрастет), сколько указание на то, чего, по моему мнению, еще недостает в опытных исследованиях такого основного вопроса, каков—вопрос о тяжести. По моему же крайнему разумению, коренные успехи в постижении других сил природы мало вероятны, пока не выяснится — опытными исследованиями — основная сила, без некоторого уразумения которой не двигалось все познание сил природы. Отвечая этой самой мысли, я в последнее время направляю, как умею и сколько мне позволяют другие обязанности и размеры остающихся сил, усилия на разные частные вопросы, касающиеся тяжести.

тем, при прочих равных условиях, меньше погрешность $\Delta(g)$ или тем большей точности можно надеяться достичь в определении напряжения тяжести.

Вследствие изложенных и иных, отчасти далее приводимых, соображений первейшим условием для достижения возможной точности нового абсолютного определения напряжения тяжести при помощи качания маятника я считаю такое увеличение длины маятника, чтобы можно было с надлежащим удобством производить с ним все определения и по возможности предохранить его от внешних влияний, могущих нарушить правильность колебаний, куда должно отнести особенно движения воздуха и колебания опоры, на которой укреплена верхняя часть маятника. По этим причинам я считаю наиболее подходящим условием для точного определения g производство наблюдений с длинным маятником, опускающимся в вертикальном колодце внутрь земли с тем, чтобы поверх оной можно было бы вести все необходимые отчеты или прямо по верхним частям маятника, или — при помощи отражения — и в тех его частях, которые погружены в колодец. Для этой цели, когда в 1901 г. государю императору, по представлению бывшего министра финансов С. Ю. Витте, благоугодно было отпустить средства для постройки во дворе Главной палаты нового здания с астрономическою при нем обсерваториею (для точного определения времен), пред началом стройки, в той части почвы, которая отвечала внутренности башни обсерватории, был начат колодец с железною трубою около 1 м диаметром. Ради безводности, прочности и других удобств, по мере вынимания земли, в нее надавливанием сверху опускались один за другим длинные колена или отдельные части обсадной трубы из толстого котельного железа, причем новые коленья приклепывались (и зачеканивались) к верхнему концу последнего колена, по мере углубления всей трубы. Предполагалось углубиться примерно на 25 м, но после опускания трубы примерно на 15 м оказалось уже невозможным подвигать трубу вниз грузом, приложенным сверху, несмотря на то, что подпочва оказалась в виде размокшей от подпочвенной воды синей глины, представлявшей полужидкую массу. Часть последнего колена даже осталась поверх земли и теперь около $1^1/_2$ м этой обсадной трубы остается поверх пола нижнего этажа здания, так что при общей глубине колодца около 16.5 м около 0.5 м пошло на закрепление нижнего отверстия трубы и около 16 м осталось для колебаний маятника. Ради доступа ко дну внутренней стенки трубы закреплены в виде лестницы железные полосы, позволяющие спускаться до дна колодца. Над этою трубою в расстоянии 0.5 м от верхнего края нижней части начинается *верхняя* труба. Свободное пространство, высотою около 500 мм, оставленное между верхом колодца и нижним концом верхней трубы, назначено для доступа в ниж-

нюю и верхнюю трубы, для установки между ними соответственных приборов для наблюдений. Пространство это окружится плотным деревянным шкафом, так, чтобы при закрытых его дверцах внутрь труб не могли проникать ни свет, ни сотрясения воздуха или его иные возмущения, могущие нарушать правильность колебаний маятника. Все отчеты предположено производить чрез назначаемые для того стекла. Над этим пространством начинается верхняя (двойная) труба. Она проходит чрез шесть этажей башни, помещенной на юго-восточном угле 5-этажного здания и имеет высоту $20.18 + 0.62$ м. Верхняя труба свободно проходит чрез все полы и своды, опирается на очень прочные (длина пролета 2.775 м, высота балок 0.305 м) стальные балки и сделана так же, как нижняя труба, из плотно склепанного толстого котельного железа. Она имеет внутренний диаметр около 0.81 м и окружена снаружи другою трубою диаметром около 1.1 м. Кольцеобразное пространство между двух труб (высотою 20.18 м) наполнено водою, которую — ради достижения равномерности температуры — можно перемешивать при помощи турбинного насоса, берущего воду сверху и вталкивающего ее снизу в упомянутое кольцевое пространство. Над верхним отверстием верхней трубы, находящимся в особой комнате 7-го этажа башни, оставлено свободное пространство высотою 1.27 м, которое предположено оградить плотным деревянным шкафом до толстой (толщина 13 мм) железной доски, закрывающей всю трубу сверху и опирающейся на две стальные двутавровые балки (высота 228 мм, длина между стен 2.810 м), заделанные в стены башни, имеющей в 1-м этаже стены толщиною 0.82 м, а в 6-м этаже толщину 0.73 м, при расстоянии 2.78 до 2.81 м. В средине упомянутой железной плиты, находящейся над трубою и имеющей толщину 13 мм, проделано круглое отверстие в 200 мм диаметром. На этой плите предполагается устанавливать часть приборов верхних частей маятника, качающегося в трубе, а потому над плитою оставлено свободное пространство высотою в 0.5 м до дна кольцеобразного водяного бака, имеющего внутри — прямо над трубою, запасное цилиндрическое отверстие диаметром в 1.2 м и высоту 1.4 м. Бак этот опирается на две особые, массивные (высота 228 мм) стальные балки. К этим последним, равно как и к балкам, поддерживающим вышеупомянутую плиту, и к ней самой можно прикреплять опоры маятника, а так как балки расположены по направлению с С на Ю, то наибольшей устойчивости такой опоры можно ждать при колебаниях маятника в этом направлении.

При указанных размерах сооружения можно придать маятнику троякую длину: 1) от верхней плиты до начала нижней трубы, около 22 м, т. е. с длительностию одного размаха около 4.6 сек., 2) от верхней плиты до дна колодца, высотою около

38 м, при размахе около 6.1 сек. и 3) от верхнего края колодца до его дна высотою около 16 м, длительность размаха около 4.0 сек.

В отношении к способу возможно точного измерения длин вышеуказанных маятников считаю полезным применить две измерительные проволоки, подобные мерам Иедрина (Jäderin), применяемым с успехом при измерении триангуляционных базисов. Проволоки предположено применять из „инвара", т. е. сплава никкеля с железом (состав $NiFe^2$), найденного благодаря прекрасным исследованиям Гильома и обладающего столь малым коэффициентом расширения (около 0.0000012 на 1° Ц), что при измерении длины в 40 м изменение температуры даже на 0.5 градуса Ц изменяет длину лишь на 0.024 мм; и во-первых, столь грубой погрешности в отчете температур нельзя сделать, и во-вторых, указанная погрешность в длине маятника отразится в g только на $\pm$ 0.000006 м, что находится в пределах других возможных и ожидаемых погрешностей g. В том и состоит одна из важных реальных выгодностей применения длинных маятников, что при них неизбежные погрешности в определении длин, как $\Delta(l)$ в (2), мало влияют на вывод g, так как погрешность ее, или $\Delta(g)$, определяется погрешностью $\Delta(l)$, умноженною на g и деленною на l, а это показывает, что при длинах маятника, бо́льших, чем g (около 9.8 м) погрешность в g менее, чем в l. Имея в виду достичь в g точности в десятых долях миллиметра (что составляет относительную точность $\Delta(g)$ (g в стотысячных[1] долях от g) должно стремиться к точности определения длины до сотых миллиметра. Для этой цели каждую инварную измерительную проволоку на соответственных местах предположено снабдить деленными шкалами или чертами и сличить, при определенном натяжении (грузом или динамометром), с метрическими прототипами, для чего в Главной палате имеется особо выверенная в Международном бюро 4-метровая мера из того же инвара. Опустив в колодец металлическую тяжелую линейку (ее вес должен соответствовать натягивающему грузу) на двух таких измерительных проволоках, закрепленных по концам линейки, при ее поднятии до прикосновения с нижним концом маятника (о контакте, происшедшем на дне колодца, можно точно судить, пропуская чрез маятник и проволоки гальванический ток слабого напряжения) можно будет по отчету близ верхнего конца маятника судить о той длине L, которую имеет маятник пред началом и концом наблюдения времен колебания. А так как, судя по предварительным опытам, при предполагаемых условиях наблюдения (весе нижнего груза, т. е. шара, толщине проволоки и пр.), такие размахи—от 1° по дуге до 2°

[1] В подлиннике „миллионных". (*Прим. ред.*)

или от 300—600 мм до 10—20 мм по линейной шкале, — при которых можно делать точные определения времен колебания, будут длиться не менее 25 часов, то весьма важно, чтобы в течение такого длинного промежутка времени не происходило в отдельных частях всей длины маятника температурных изменений, превосходящих определенные пределы (около 0.°2). Это условие точности может быть легко достижимо в описанной выше обстановке трубы для длинных маятников, так как прямой опыт убедил, что при работе насоса (приводимого в действие током), перемешивающего воду, температура верхней трубы (длиною около 21 м), близкая к окружающей, легко сохраняется неопределенно долго по всей длине с постоянством до 0.°1, а в колодце она изменяется в сутки лишь на сотые доли градуса даже в верхних частях, в нижних же слоях сохраняется с примечательнейшим постоянством. Вся вышеописанная обстановка позволяет вести целые сутки, даже двое суток, наблюдения над колебаниями длинных маятников с ручательством за достаточное (для надлежащих поправок на изменение длин) постоянство температуры.

§ 2. **Система маятников разной длины.** Хотя теория физического маятника представляет образцовое совершенство и с успехом сводит наблюдаемые в действительности длины L и времена[1] T, при помощи разнородных поправок, к простоте отношений $g = \pi^2 l t^{-2}$, свойственных так называемому математическому маятнику, при котором предполагаются колебания в пустоте, невесомость нити или стержня, весомость прикрепленной на конце точки и отсутствие каких-либо сопротивлений, все же уму свойственно сомневаться, во-первых, в полноте всякого рода абстрактных соображений, во-вторых, в правильности всех поправок, вводимых для приведения наблюдаемых конкретов к умственному абстракту и, в-трётьих, окончательное убеждение в истинах искать лишь в согласовании абстрактных представлений с наблюдениями и измерениями действительности. История исследований маятника представляет множество примеров, подтверждающих вышесказанное. Так, напр., первоначально упускалась из виду необходимость поправок на величину размахов, т. е. не делалось приведения наблюдаемых времен к бесконечно малым размахам, а ныне, когда эти поправки всегда вводят, не сомневаются в полной их удовлетворительности, для чего в этом случае (а отчасти и в других случаях) индукциею служит то указание, что происходящая от того поправка, при малых размахах, по своей незначительности впадает в область неизбежных погрешностей измерений всякого рода. Более поучительна очень сложная история поправок на приведение к пу-

[1] В подлиннике „времени". (*Прим. ред.*)

стоте наблюдений, произведенных в воздухе, так как, не взирая на теоретическую и опытную разработку этого предмета, после Ньютона, Гюгенса, Эйлера, Дю-Бюа, Бесселя, Бейли, Стокса и др., и поныне предмет этот нельзя считать окончательно выясненным, как можно судить уже по упомянутому выше собранию мемуаров, касающихся маятника. Всего же более сомнений и по настоящее время возбуждает обычное допущение абстракта о том, что трение в ноже (призме) или в гнущейся при колебаниях проволоке не оказывает заметного влияния на времена колебаний маятника.

Из того, что в разреженном пространстве размахи убывают не столь быстро, как давления, и при крайнем разрежении убыль размахов все еще совершается со скоростью довольно значительною и разнообразною в разных условиях (вследствие различия в трении), из того, что трение ножа (призмы) о подставку или трение при сгибании проволоки по существу сходственны с другими видами трения, явно влияющими на скорости и времена, и, наконец, из того, что прямой опыт показал мне значительные изменения времен колебания весов при изменении трения ножа (призмы), лично я склоняюсь к признанию влияния трения на время колебания маятника [1] и даже полагаю, что одну из причин несогласия численных определений, касающихся напряжения тяжести в данном месте, составляет упущение из вида поправки на трение около оси качаний. Эти соображения, вместе с рядом других, далее излагаемые, равно как и пример Бесселя (1826 г.), Деффоржа (1887—1894 гг.) и многих других, побуждают меня считать наиболее точным способом для определения напряжения тяжести g (или что, в сущности, то же самое — для определения длины секундного маятника, ибо она равна g/π^2 или $= g\ 0.1013212$) вывод из наблюдений над временами T и T_1 колебания двух физических маятников, имеющих длины L и L_1, при одном и том же колеблющемся грузе, при одинаковых угловых величинах размаха,[2] при одинаковом трении

---

[1] Конечно, весы и маятники колеблются в очень неодинаковых условиях; у весов центр тяжести лежит близко под точкою опоры, а у маятников взаимное их расстояние велико, но причина и род явлений совершенно одни и те же, а потому заключение от весов к маятнику — по отношению к трению острого ребра призмы — нельзя считать неосновательным. Мне кажется вообще, что связь между весами и маятниками заслуживает большего внимания, чем то, которое ныне замечается в этом отношении. Особо поучительным переходом здесь служит метроном, т. е. медленно колеблющийся маятник с грузом выше и ниже точки опоры. Теория как физического маятника, так и весов как одних из важнейших измерительных приборов, много бы выиграла, если бы точное опытное изучение метрономов разных систем было выполнено. Часть опытов, сюда относящихся, начата в Главной палате и, вероятно, будет современем опубликована.

[2] В подлиннике „размахах". [(*Прим. ред.*)

(т. е. качающихся на одних и тех же ножах или призмах, на тех же местах подставок или при одинаковой толщине проволоки, служащей для подвешивания), в одинаковой атмосфере и вообще при возможной одинаковости всех обстоятельств, могущих влиять на длины и времена колебаний. Если через λ назовем сумму всех поправок наблюдаемой длины L, а чрез τ — сумму всех поправок наблюдаемых времен T для приведения маятника к тому состоянию, которое представляется для математического маятника, т. е. если $L+\lambda=l$ и $T+\tau=t$, то для обоих маятников будет справедливо основное уравнение (1), а потому:

$$l_1=\frac{g}{\pi^2}t_1^2 \quad \text{и} \quad l_2=\frac{g}{\pi^2}t_2^2,$$

откуда очевидно, что

$$g=\pi^2\frac{(L_1+\lambda_1)-(L_2+\lambda_2)}{(T_1+\tau_1)^2-(T_2+\tau_2)^2} \quad \ldots\ldots\ldots (3_1)$$

Раскрывая скобки и заметив, что при больших L и T (как и будет при длинных маятниках) поправки λ и τ сравнительно с ними вообще малы, а разность квадратов $\tau_1^2-\tau_2^2$ в пределах точности наблюдений, при одинаковости многих упомянутых условий, может быть по своей малости пренебрежена (т. е. принята входящею в пределы неизбежных погрешностей), получаем:

$$g_1=\pi^2\frac{L_1-L_2+(\lambda_1-\lambda_2)}{T_1^2-T_2^2+2(T_1\tau_1-T_2\tau_2)} \quad \ldots\ldots\ldots (3_2)$$

При рассмотрении поправок на длину и время (§§ 6 и 7) мы увидим, что их относительная величина нередко уменьшается с увеличением длины маятника, и что многие из поправок, а для длины даже большинство, в разности $(\lambda_1-\lambda_2)$ совершенно пропадают при соблюдении определенных условий (равенств веса, размеров), а потому получение g по (3) во многих отношениях представляет возможность достижения наибольших степеней точности. На этом исходном начале, мне кажется, не только полезным основать выводы о величине напряжений тяжести в Главной палате, но и желательно испытывать или сравнивать различные способы, для того применяемые, хотя труд при том очевидно возрастает.

Итак, для точного определения напряжения тяжести в Главной палате предположено пользоваться, между прочим, способом разностей, применявшимся Бесселем и Дефоржем, хотя и при меньших исходных длинах маятников. Так как длина наибольшего возможного в нашей обстановке маятника достигает 38 м, а за вычетом длины в 21 м, отвечающей маятнику верхней трубы, получается около 17 м, то для наблюдений предположен еще

маятник длиною около 4 м (время размаха около 2 сек.), так как 21 без 4-х опять дает разность около 17 м. Это позволяет сделать несколько сличений, представляющих свои выгоды. Для колебаний такого 4-метрового маятника будет служить чугунная труба с внутренним диаметром около 250 мм[1] с боковыми трубками для вставления стекол, через которые можно производить отсчеты и измерения. Такая труба позволит произвести для каждого груза наблюдения в разреженном пространстве и в различных газах, чтобы иметь возможность делать точную поправку на приведение к пустоте. А так как в той же трубе можно будет наблюдать и колебания короткого маятника, длиною, напр. в 0.5 м, что даст возможность пользоваться этою трубою для независимых определений по разности, то в результате, быть может, мы будем иметь данные о временах колебания пяти маятников: двух в чугунной трубе длиною около 1) 0.5 м и 2) 4.0 м и трех длинных, а именно: 3) около 16 м — в колодце, 4) около 21 м — в верхней трубе и 5) около 38 м — в верхней трубе вместе с колодцем. Из данных для пяти таких маятников может составиться по системе разностей десять определений g, а именно: 5—1; 5—2; 5—3; 5—4; 4—1; 4—2; 4—3; 3—1; 3—2 и 2—1. Во всяком же случае предположено получить по крайней мере три разностных определения, а именно: наблюдать маятники длиною около 38 м, 21 м и 4 м, что даст три значения g (для 38—4 м, для 38—21 и для 21—4 м). Идя таким путем, т. е. получая из опыта напряжение тяжести как из времен колебания отдельных маятников разных длин (по 1), так и из разностей для двух маятников (по 3), я надеюсь можно будет чрез сличение выводов и чрез анализ приемов, для них примененных, не только узнать предел точности, с которою можно ныне определить напряжение тяжести, но и получить его абсолютную величину и со всею доступною степенью точности, а также даже, вероятно, составить понятие о влиянии трения около точки подвеса.[2] Правда, что такие ряды определений, какие нужны при исполнении предначертанного, потребуют много трудовых усилий и времени от специалистов-наблюдателей, но в этом отношении Главная палата мер и весов обла-

[1] Диаметр чугунной трубы около — 250 мм — избран в том расчете, чтобы в этой трубе можно было производить колебания таких же угловых размахов, как и в большой трубе (описанной в § 1), для шаров, обладающих размерами предположенного золотого шара. Говоря вообще, размахи предполагается иметь не превосходящие уклоном 30′, т. е. для всего размаха 1°, чтобы по возможности уменьшить поправку на приведение к размахам бесконечно малых размеров.

[2] Само собою разумеется, что при сличении данных, полученных для маятников разной длины, наблюдаемых — по необходимости — на ощутимо различных высотах, придется, при нахождении g, делать приведение к одному уровню, что однако не представит, надо полагать, поводов к новым погрешностям.

дает совокупными силами многих ученых, в ней собранных, и так как ничто не принуждает спешить окончанием задуманной работы и она может исполняться по частям, то сложность предстоящего труда не представляет существенного препятствия для его осуществления. По указанной причине и вследствие того, что лицам, служащим в нашем учреждении, иногда необходимо посвящать много времени исполнению других дел, входящих в круг обязанностей Главной палаты, статьи, посвященные определению напряжения тяжести или с ними связанные, будут публиковаться в тех частях, которые закончены, не дожидаясь общего окончания всей предпринимаемой работы.

По отношению к 4-метровой чугунной трубе для наблюдений с маятниками в пустоте прибавлю, что кроме самой трубы подготовляется и место для ее закрепления, а именно в центральной весовой комнате главного здания Палаты, потому что помещение это отличается возможностию долго (сутками) удерживать в нем чрезвычайное (до сотых градуса) постоянство температуры, благодаря удаленности от наружных стен и труб, служащих для отопления. Нижнюю часть чугунной трубы предположено опустить, ради удобства всех наблюдений, под пол весовой комнаты, в подвальный этаж, а именно в часть его, окруженную (для отделения от окружающих коридоров), как и весовая комната, толстыми кирпичными стенами в 3 и $2^1/_2$ кирпича (85 и 75 см). Закрепление всей трубы будет сверху, в той части, где лежат точки подвеса колеблющихся внутри маятников.[1]

§ 3. **Форма и вес грузов для предполагаемых маятников.** При определении абсолютного напряжения тяжести или длины секундного маятника, когда стараются приблизиться в опыте к математическому представлению о маятнике, всегда до сих пор придавали его грузу форму шара и подвешивали его на возможно легкой или тонкой нити или проволоке, потому что тогда соответствие с математическим первообразом наиболее естественно и все расчеты (поправки) для приведения к нему наиболее просты. В наших опытах предположено держаться того же начала уже потому, что есть вышеуказанные выгоды применения длинных маятников, а при них иначе устраивать маятники, как при помощи подвешивания на проволоке, было бы мало возможно или, по крайней мере, очень сложно и неудобно.[2] При этом мне кажется наиболее целесообразным сохра-

[1] Особыми определениями, подобными сейсмографическим, предполагается определить как для этой трубы, так и для главной башни степень неподвижности точек подвеса маятников.

[2] При этом дело идет, конечно, исключительно об обычной форме маятника, а не о маятнике оборотном, которым ныне, после примеров Кэтера, Бесселя и др., чаще всего пользуются для определения длины секундного маятника

нить и шаровую форму груза маятника, хотя несомненно, что при одинаковой массе сопротивление шара при колебании в воздухе значительнее, чем для чечевицы или заостренного цилиндра, колеблющегося в плоскости оси. Хотя уменьшение сопротивления имеет большое значение для продолжительности колебаний, т. е. для уменьшения скорости их убыли или для получения возможности продолжительных наблюдений над временами колебаний, от чего много зависит степень точности в определении среднего времени одного бесконечно малого размаха, и хотя придание маятнику формы чечевицы (с горизонтальной или вертикальной осью симметрии) представляет свои несомненные выгоды, заставляющие в обычных часах и в маятниках, служащих для определения относительного напряжения тяжести, часто придавать грузу маятника чечевичную форму, тем не менее в опытах Главной палаты предположено пользоваться предпочтительно шаровыми грузами не только по простоте и естественности такого приема, но особенно потому, что при всех возможных положениях только у шара сопротивление воздуху будет одинаковым. Для того же, чтобы маятник сохранял в воздухе[1] возможно долгое время начавшееся колебание, т. е. для того, чтобы размахи убывали медленнее, давая возможность (без крайнего уменьшения размахов, ибо при очень малых размахах нельзя делать точных отсчетов времен колебаний) делать определение времен одного колебания в течение долгого времени, для этого, очевидно, более всего необходимо и важно, чтобы груз маятника имел значительный абсолютный вес и большой

или напряжения тяжести. Наиболее совершенною формою оборотного маятника должно считать цилиндрическую, как у Деффоржа, и если окажется возможным по окончании опытов в упомянутой 4-метровой чугунной трубе, я считаю очень полезным в ней же сделать (при наибольшем возможном разрежении воздуха) определение g с длинным цилиндрическим (трубчатым) оборотным маятником. Но, говоря вообще, я не считаю возможным достичь с оборотным маятником высших степеней точности в определении напряжений тяжести уже по той причине, что здесь надо применять колебание на призмах, что влечет за собою сомнения, упоминаемые и в следующих параграфах. Сверх того в оборотном маятнике неизбежно необходима сложность формы и массивность частей, соединяющих призмы, а это влечет за собой то, что одинаковость времен колебания, достигнутая в воздухе, не повторяется в пустоте и вся поправка „на пустоту" значительна и сомнительна. Главное же: оборотным маятникам невозможно придать большой длины, а это, как видели в § 1, определяет возможность достижения наибольшей точности g. Итти далее 4 метров в оборотных маятниках едва ли ныне практически возможно. Но 4-метровый оборотный маятник все же я постараюсь испытать.

[1] В пустоте или в разреженном воздухе убыль колебаний замедляется, но все же происходит, как в обычных условиях, показывая этим, что трение твердых частей маятника около точки опоры поглощает силу, движущую маятник, совершенно так же, как воздух или другая среда, в которой происходят колебания маятника, и трудно думать, чтобы такое отношение оставалось без всякого влияния на времена колебаний.

удельный вес. Что касается до последнего, из доступных веществ известны только два, а именно золото и платина (и их сплавы), обладающие высшим удельным весом; первое около 19.3, вторая около 21.0. Потому-то многие исследователи, вслед за Борда и Кассини (1792 г.), применяли для маятников небольшие платиновые шары, что очень легко достижимо при малом весе груза, но по причинам, далее выясненным, нашим длинным маятникам желательно придать груз весом до 50 кг, а при этом ныне, когда ценность платины приравнялась или даже превзошла цену равного веса золота, большой груз платины мало доступен и груз из золота заслуживает во всех отношениях наибольшего внимания, тем более, что обработка массы золота сравнительно с платиною гораздо легче и после применения к маятнику масса золота никогда ничего не потеряет в своей стоимости. Притом нет таких видимых препятствий к легкому получению чистого сплавленного золота в любом количестве повсюду, так как запасы золота имеются во всех странах, тогда как большую массу сплавленной платины очень трудно получить помимо ограниченного числа заводов, переделывающих этот ценный металл. На основании сказанного, зная о больших запасах золота, хранящихся в Государственном банке и на Монетном дворе, я обратился к е. в. п. г-ну министру финансов В. Н. Коковцеву с просьбою о временном снабжении Главной палаты потребным для маятника золотом с тем, чтобы Монетный двор отлил и обточил требующуюся для опытов массу золота, и с тем, чтобы после опытов масса была возвращена обратно для пополнения золотого запаса. На выполнение такой просьбы его высокопревосходительству Владимиру Николаевичу, как упомянуто уже выше, угодно было благосклонно согласиться в виду научной задачи, преследуемой Главной палатою. Притом это согласие было дано после заявления о потребности до 50 кг золота, так как по причинам, далее изложенным, я пришел к заключению о потребности придать грузу вес около 3 пудов.

Что касается до веса золотого шара, назначаемого для колебаний в маятнике, то он до некоторой степени определился из предварительных опытов сперва над качанием чугунных гирь в 5 и 10 кг, потом в 1 и 2 пуда (16.4 и 32.8 кг). При испытании они колебались на стальных фортепьянных, т. е. закаленных, проволоках диаметром в 1 и 0.75 мм, длиною в 21 и 38 м, именно в трубе и колодце, описанных в § 1. Наблюдения, в этом отношении произведенные А. А. Ивановым, назначались исключительно для того, чтобы получить первоначальное понятие о зависимости быстроты убыли размахов от веса колеблющегося груза, а также от длины и диаметра проволоки и в тех условиях, которые близки к предполагаемым в действительных наблюдениях, назначаемых для определения g. Результаты этих пред-

варительных опытов с гирями усложнились, как и должно было предвидеть, не только тем, что груз был подвешен на единичной проволоке, наверху защемленной в зажиме, но и не вполне шарообразною формою взятых для опыта обычных пудовых гирь, имеющих ручки (скобы) для поднятия. Такие гири были взяты в опыты лишь потому, что действительных шаров весом в 1 и 2 пуда в распоряжении к надлежащему сроку еще не было, а названные гири имели форму, довольно близкую к шаровой. Сопротивление ручек, к которым прикреплялись (особым зажимом) проволоки, усложняло явление не только по причине формы ручек, но и потому, что при продолжительном качании положение ручек в отношении плоскости колебания изменялось, а это влияло на правильность убыли размахов. Что же касается до колебания на зажатой вверху проволоке, то оно вело к перемене плоскости колебаний — вследствие суточного вращения земли (опыт Фуко), и эта перемена в условиях опытов оказалась очень близкою к 65° от востока к югу в продолжение 10 часов качаний, что близко к теоретическому расчету на широте опыта (59°55′6″ сев. широты). Непрерывное изменение плоскости колебаний (как и упомянутых ручек гирь) препятствовало надлежащей точности отсчетов элонгаций, производившихся по миллиметрической шкале, поставленной (горизонтально, в плоскости колебаний) на таком расстоянии от точки подвеса, что 1′ (по дуге) отвечала более чем 6 мм; но так как отсчеты производились на-глаз и в неблагоприятных для точности условиях, то точность их, конечно, не превосходит десятых долей минуты. Тем не менее произведенные опыты довольно определенно отвечали на поставленные вопросы. Они прежде всего показали, что от диаметра проволоки скорость уменьшения размахов зависит лишь в очень малой мере, хотя все же, чем тоньше проволока (т. е. чем она гибче, или чем менее идет силы на трение в точке подвеса), тем медленнее идет убыль размахов. Так, например, при гире в 2 пуда и при длине маятника около 22 м,[1] исходя из начального размаха в 84′ (по дуге), величина размахов, в минутах, была:

0 час.	Чрез 1 час.	Чрез 3 час.	Чрез 6 час.
84.′0	64.′3	43.′3	27.′8 для проволоки в 1 мм
84.′0	64.′8	44.′4	28.′2 „ „ „ 0.75 мм

Разность в убыли размаха даже едва превосходит в указанном случае меру погрешностей, возможных в этих предварительных и разведочных определениях. При различии длин разность эта уже заметнее. Для гири в 2 пуда, при толщине про-

[1] В подлиннике „мм". (*Прим. ред.*)

волоки в 0.75 мм, исходя из начального размаха в 58.3 минуты (по дуге), получены размахи (в минутах):

0 час.	Чрез 1 час	Чрез 3 часа	Чрез 6 час.	Чрез 9 час.	Чрез 21 час	При длине маятников
58.′3	44.′5	28.′3	16.′4	10.′8	2.′9	37.3 м
58.′3	48.′3	34.′8	23.′0	15.′1	3.′8	22.9 м

Отсюда очевидно уже, что размахи колебания длинного маятника уменьшаются быстрее, чем для более короткого. Это должно приписать не только тому, что длиннейшая проволока, сопротивляясь воздуху, оказывает более задерживающее влияние, чем более короткая, но также и тому, что груз более длинного маятника при одинаковых угловых величинах размахов, совершает путь более длинный, чем короткий маятник, так как длины дуги возрастают пропорционально длинам маятников, а времена качания только пропорционально квадратным корням из длин маятников. Это показывает, что линейные скорости грузов возрастают пропорционально длине маятника, при возрастании же линейных скоростей все сопротивление воздуха, очевидно, должно возрастать, а чрез это убыль размахов увеличивать.[1] Сверх двух указанных причин, объясняющих преимущественную убыль размахов длинного маятника, в нашем опыте была еще третья, определяемая тем, что колебания гири при длинном маятнике происходили на дне колодца, где температура была около 7.°0, при коротком же маятнике гиря двигалась в воздухе, имевшем температуру около 17°, а потому сопротивление воздуха, зависящее от его плотности, возросло при переходе от короткого маятника к длинному. А так как и при предстоящих наблюдениях должно ждать такого отношения, то при обсуждении веса шара, необходимого для продолжительных отсчетов колебаний, должно принять во внимание преимущественно длинный маятник, так как вес, для него пригодный, будет, очевидно, пригоден и для наблюдений с более короткими маятниками.

Уже по отвлеченным соображениям, относящимся к инерции, производящей самые колебания, очевидно, что при прочих равных условиях убыль размахов должна уменьшаться с возрастанием массы движущего груза маятника. Опыт явно подтверждает такое заключение, как видно из того, что при длине маятника

---

[1] В этом отношении особо интересно будет произвести наблюдения в безвоздушном или сильно разреженном пространстве, что я и предполагаю сделать, когда будут готовы 4 полуметровые маятники, равно как и чугунная труба, для наблюдения их назначаемая (§ 2). Вообще же, согласно с тем, что писали Стокс и другие физики, я полагаю, что теория и практика физического маятника во многом могут выиграть, когда будут расследованы законы убыли размахов маятников — под влиянием различных причин. С своей стороны я предполагаю предпринять в Главной палате часть опытов, сюда относящихся, как о том говорю в различных частях этой вступительной статьи.

около 22 м и при диаметре проволоки 0.75 мм величина размахов (в минутах дуги) была следующая.

Исходя из	Чрез 1 час	Чрез 3 часа	Чрез 6 час.	Чрез 24 часа	Вес колеблющегося груза
85.′4	66.′0	45.′2	28.′7	3.′3	2 пуда
85.′4	56.′8	31.′9	15.′3	1.′4	1 пуд
Разность	10.′2	13.′3	13.′4	1.′9	

Не менее очевидны преимущества большого груза при длине маятника около 37.3 м (диаметр проволоки тот же: 0.75 мм), потому что тогда получены размахи:

Исходя из	Чрез 1 час	Чрез 3 часа	Чрез 6 час.	Чрез 24 часа	Вес колеблющегося груза
56.′9	43.′5	27.′6	16.′0	10.′5	2 пуда
56.′9[1]	37.′3	19.′8	9.′6	5.′3	1 пуд
Разность .	6.′2	7.′8	6.′4	5.′2	

Для получения возможно точных времен колебаний желательно, чтобы размахи сохраняли определенные пределы как можно дольше, но, чтобы остановиться на каких-либо практически осуществимых величинах, я принял за норму наблюдение времен колебания в продолжение целых суток. При этом могут достигаться разные выгоды относительно сличения времен с суточным обращением звезд, что служит для точной проверки хода часов, т. е. для приведения к среднему времени. Кроме того, по истечении суток, положение солнца и луны почти возвратится к начальному, и, если существуют сколько-либо ощутимые влияния этих светил на напряжение тяжести, оно может в общем суточном среднем результате быть почти устранено, и получаемое число ответит действительности более, чем наблюдения, произведенные лишь в течение долей суток.

С другой стороны, так как основная формула маятника (1) и самое понятие об изохронизме относятся только к бесконечно малым размахам, вследствие чего наблюдаемые времена необходимо, пользуясь формулою Бернулли,[2] исправлять для приведе-

[1] В действительности исходные размахи часто не были совершенно одинаковы, напр. при гире в 2 пуда 58.′3 (или 371.1 мм), а при гире в 1 пуд 56.′9 (или 361.6 мм), но так как понятие о логарифмическом декременте вполне (в пределах погрешностей) приложимо для расчета близких по времени размахов, то легко было из собранных (обыкновенно чрез каждые полчаса) наблюдений расчесть размахи для всех промежуточных времен. Так, здесь приведение сделано к исходу 56.ᵐ9.

[2] А именно, если при угле полуразмаха (т. е. при отклонении от вертикали) α наблюдено время t', то время при бесконечно малом размахе:

$$t = \frac{t'}{1 + \frac{1}{4}\sin^2\frac{\alpha}{2} + \frac{9}{64}\sin^4\frac{\alpha}{2} + \ldots}$$

Если $\alpha = 1°$, то $t = t'/1.000019054$, а при $\alpha = 20$ значение $t = t'/1.000002117$, что уже недалеко от предела погрешностей, возможных при определении t'.

ния к таким размахам, а в полной точности такого исправления нет надлежащей уверенности, как о том писал уже Себейн (Philosophical Transactions, 1831, p. 461) и другие, то для точности вывода желательно, сверх проверки указанной формулы, пользоваться только такими наблюдениями, в которых начальные размахи не превосходят 1° по дуге (т. е. уклонения или полуразмахи α не превосходят 30′). Это требование в предполагаемых определениях внушается еще и тем, что при длине маятника около 38 м размах в 1° для шара диаметром в 0.3 м требовал бы широты трубы более $0.663+0.3$, или более той, какая придана трубе колодца. Что же касается до диаметра шара в 0.3 м, то он отвечает чугунному шару весом около 100 кг, а такой именно шар, между другими, предположено применить в предстоящих наблюдениях и колебать на дне колодца. Отсюда выводится высший предел для той величины размахов, с которых предположено в норме начинать отчеты о временах колебаний, а именно размахи около 60′ по дуге. Что же касается до низшего предела тех величин размахов, при которых возможно точное определение времени прохождения чрез положение равновесия, то я считаю его никак не меньше 2 минут по дуге, потому что такая дуга при 4-метровом маятнике представит не более как 2.4 мм; а проволока, на которой предположено колебать шары, будет достигать диаметром до 1 мм, что едва ли позволит уловить момент средины размаха, где скорость наибольшая.

Из всего предшествующего вытекает, что наблюдения должны вестись при размахах от 60′ до 2 минут (по дуге) и желательно, чтобы в указанных размерах колебания оставались для наиболее длинного маятника не менее суток не только для золотого шара, но и для равного ему по объему чугунного шара, так как сверх золотого шара, для определения влияния воздуха, я полагаю необходимым колебать и равнообъемный с ним чугунный шар, и желательно его колебания проследить также в течение целых суток. Из предварительных же наблюдений, часть которых сообщена выше, с очевидностью следует, что правильный чугунный шар (а не гиря с ручкою, как в описанных выше опытах) около 2 пудов весом, на проволоке диаметром не более 0.75 мм, начав размахи от 60′, после 24 часов колебания сохранит и при длине маятника в 38 м размахи около двух минут — по дуге, а золотой шар весом около 3 пудов наверное будет сохранять в течение суток размахи от 60 до 2′ и примерно того же должно ждать даже для равнообъемного ему чугунного шара, хотя его вес будет около 18 кг. Не идя выше, а остановившись на весе около 50 кг (т. е. около 3 пудов) для золотого шара[1] как одной из

[1] Вероятно для колебаний в одни сутки совершенно достаточно было бы взять золотой шар весом в 10—15 кг, но ради осторожности взят был возможно

исходных величин для всех предварительных соображений, я имел в виду кроме экономических соображений еще и то обстоятельство, что 50-килограммовый золотой шар (считая уд. вес отлитого золота равным 19. 2) будет иметь диаметр около 170 мм, а при таком размере груза и при длине маятника в 4 м размах в 1° потребует ширины трубы 70+170 мм = 240 мм, что как раз соответствует приготовленной для опытов чугунной трубе (§ 2), так как ее диаметр лишь на несколько миллиметров превосходит потребные размеры, и этот избыток вполне необходим для начальных размахов, предшествующих тем, с которых должны начаться отчеты.

Сверх золотого шара, весящего около 500 кг, предполагается наблюдать колебания чугунных шаров: 1) того же объема, как золотой, 2) такого же, как золотой шар, веса, 3) весом вдвое меньшего и 4) весом вдвое большего, т. е. около 100 кг весом, а затем 5) шары почти того же объема, как золотой, но по плотности вещества более легкие. Легчайший шар предположено изготовить из сплава 100 частей канифоли с 25 частями желтого воска, так как такой сплав можно обтачивать, он однороден и представляет уд. вес около 1.05. Наблюдения над маятниками, снабженными вышеуказанными шарами весьма разнообразной плотности (около 19—для золота, около 7—для чугуна и 1—для канифоли), я считаю очень полезными для выяснения многих сторон дела, особенно же для введения надлежащей поправки на вес и на сопротивление воздуха, как это отчасти развивается в одном из следующих параграфов.

§ 4. **Подвешивание маятников.** К применявшимся доныне четырем обычным способам подвешивания груза маятников мне кажется полезным и даже необходимым присовокупить пятый. А именно доныне применялось:

1) Подвешивание груза на проволоке или на нити (однородном волокне), закрепленной наверху в зажиме (напр. Кондамин в 1735, О. Е. Мейер в 1871 г. и др.).

2) Подвешивание груза на проволоке, кончающейся наверху гибкою пластинкою, перекинутою чрез горизонтальный цилиндр (а затем, конечно, закрепленною), чтобы избежать при помощи этой пластинки изменений в плоскости колебания. Так поступил Бессель в 1826 г.

3) Подвешивание груза на проволоке, закрепленной наверху к призме (напр. Борда и Кассини 1792 г.), качающейся на твердой опорной площадке.

4) Качающийся груз составляет одну твердую (лишенную гибкости, свойственной проволоке) систему со стержнем, на-

---

больший шар, тем более, что равнообъемные шары из более легких (чем золото) веществ, при весе золотого шара в 10—15 кг имели бы малый вес и колебания их чересчур скоро бы убывали.

верху снабженным призмою, опирающеюся на твердую площадку.

Хотя маятники, качающиеся на призмах (3 и 4), обеспечены от перемены плоскости колебаний, подобно Бесселевскому маятнику, качающемуся на гибкой пластинке (2), но представляют два основных или принципиальных недостатка, а именно несовершенство (а равно и порчу) острия призмы и возможность его скольжения по твердой опорной площадке, что доказано уже многократно. В предпринимаемых наблюдениях предполагается подвешивать большие грузы, а потому несовершенство первоначальной обточки острого ребра призмы и вероятность порчи его, определяемая продолжительностью пользования одною призмою для многих наблюдений с разными грузами и при различной длине проволок, вместе с возможностью увеличения скольжения по плоскости твердой подставки, весьма вероятной по причине продолжения наблюдений с данным маятником в течение по крайней мере 24 часов, внушают опасения за успешность выполнения задачи при помощи качания на призме. Хотя мною уже приняты некоторые меры для производства колебаний маятников с помощью призм,[1] но все же я возлагаю наибольшие надежды на вновь здесь предлагаемый способ подвешивания, надеясь, что предварительные опыты оправдают возможность и пользу его применения. В предлагаемом способе:

5) Подвешивание груза производится на двух проволоках одинаковой длины, закрепленных на верхней части шара, а вверху зажатых в точках, лежащих на одной горизонтальной плоскости.

Такой способ подвешивания, во-первых, дает некоторое обеспечение в сохранении плоскости колебаний даже при продолжительной их длительности (чего нет в подвешивании, указанном под цифрою 1), во-вторых, устраняет, если не вполне, то в значительной мере возможность кручения проволок и колебаний шара около вертикальной оси (что возможно при 2-м способе подвешивания), в-третьих, исключает скольжение и многие другие недостатки, свойственные подвешиванию на призмах (3 и 4), в-четвертых, приближает (в отличие от подвешивания по 4-му способу) весь маятник (как в случаях 1, 2 и 3) к тому идеальному или, так называемому, математическому маятнику,

[1] Призмы заказаны и обещаны фирмою Рупрехта в Вене, потому что в Главной палате от этой фирмы имеются весы, поднимающие до 75 кг (следовательно центральная призма выдерживает 150 кг) и эти весы отличаются чувствительностью до частей миллиграмма, и эта чувствительность сохраняется очень прочно, указывая на искусство фирмы Рупрехта в производстве прочных острых призм. Вообще, я желал бы сделать ряд определений как с защемленными проволоками, так и с призмами. В этом последнем случае, при пользовании способом разностей (§ 2), конечно, для маятников разных длин не только должно применять те же грузы, но необходимо пользоваться и одними и теми же призмами и опорными площадками.

на котором основан весь способ определения маятником напряжения тяжести, так как проволоки могут весить очень мало сравнительно с грузом и, в-пятых, предлагаемый здесь способ подвешивания так же прост для практического осуществления в маятниках разной длины, как и самый первый из применявшихся способов, т. е. подвешивание на одной проволоке, не имея его существенного недостатка, ясно выступающего в длинных тяжелых маятниках, потому что при двупроволочном подвешивании не могут происходить (как и при качании на пластинке или на призме) те изменения плоскости колебания, которые зависят от суточного обращения земли, что прежде всего препятствует установке приборов, назначаемых для измерения времен колебаний. Но уже по своей новизне способ двупроволочного подвешивания, конечно, потребует предварительных опытов и изучения, что и предположено выполнить в Главной палате.

При двупроволочном подвешивании груза маятника представляется весьма важным вопрос о месте и способе закрепления проволок на поверхности шара. Что касается до места закрепления, то на первый взгляд может показаться, что концы проволок должны быть закреплены по горизонтальному диаметру шара, так как тогда расстояние проволок увеличивается до естественного предела, а чрез это наиболее обеспечивается сохранение плоскости колебаний. Но при таком способе закрепления легко могут совершаться особые колебания шара около горизонтального диаметра, на концах коего закреплены проволоки, так как центр тяжести шара лежит около или даже на том же диаметре. Поэтому я предполагал сделать закрепление проволок в точках, отстоящих друг от друга около на 120° или примерно на половине высоты верхней части шара, т. е. так, чтобы его центр лежал на половину радиуса ниже линии, соединяющей точки закрепления. Однако при этом должно ждать вертикальных вращений шара, так как между проволоками придется около 97% веса шара, а с краев будет только около 3% по весу (или по объему). Равенство массы вне и между вертикальными плоскостями (параллельными с плоскостью колебаний маятника), проходящими чрез проволоки — в состоянии покоя — получится, когда точки подвеса будут в расстоянии от 40 до 41° по дуге большого круга шара. При делении этого круга на 9 равных частей[1] достигается расстояние в 40°, а потому в особых опытах предположено проследить свойства долгих колебаний при под-

[1] Разделение окружности шара на равные части, при назначении места закрепления проволок на шаре, имеет то значение, что места эти должны переменяться по окружности, когда будет испытываться равномерность массы шара чрез сравнение времен качания при разных точках закрепления.

вешивании за точки, расстоящие по окружности от 40 до 180°. Само собою разумеется, что необходимо следить за равенством длины двух проволок и за горизонтальностью линии их закрепления вверху, потому что иначе получатся колебания не в вертикальной плоскости, а по конической поверхности. С другой стороны, предполагается испытать значение параллелизма или же расходимости проволок на свойства продолжительных колебаний. Окончательные ответы дадут лишь опыты. Очевидно, по сущности дела, что в той же плоскости, в которой будут находиться натянутые проволоки, т. есть в плоскости, перпендикулярной к плоскости колебаний, будут лежать как центр тяжести шара, так и точки закрепления проволок, а потому при спокойном положении шара получится некоторая возможность судить об относительном положении центра тяжести шара и центра его фигуры, т. е. судить об однородности материала, для чего между прочим предварительно предполагается собрать соответственные данные, а именно, определить удельные веса как всего шара, так и частей, отделенных от него при механической обработке.

Что касается до способа скрепления проволок с шаром, то и этот, на вид столь простой предмет, представляет своего рода трудности, потому что поверхность шара желательно сохранить во все время наблюдений по возможности совершенно неизменною, а, однако, точки закрепления проволоки необходимо изменять, как делали сыздавна многие исследователи в виду возможной неравномерности распределения массы в шаре, т. е. несовпадения центра фигуры с центром тяжести. После разного рода попыток пришлось остановиться на двух способах, окончательный выбор одного из которых должно отложить до времени действительных наблюдений, так как первый способ ведет к полной сохранности поверхности шаров, но все же представляет некоторый риск отрыва, а второй, хотя не существенно — при больших массах шаров, нарушает однородность их массы. Первый способ состоит в приклеивании (или, лучше сказать, в припаивании) к поверхности шара мастикою, далее описываемою, тонкой, выточенной по шаровой поверхности металлической пластинки, снабженной ушком или отверстием для закрепления проволоки, а второй состоит в продевании и закреплении конца проволоки в возможно тонком и коротком (а потому легком) цилиндре, снабженном винтовою нарезкою, входящею в надлежащих местах в нарезки, сделанные на поверхности шара. Последний способ, не требующий дальнейшего разъяснения, будучи совершенно надежным и не представляя по видимости трудностей ни при выполнении, ни при введении в расчеты надлежащих поправок, все же страдает тем, что для перемены мест прикрепления на поверхности шара должно будет сделать по большому кругу по крайней мере 3 углубления, на расстоянии 120°,

по дуге, из которых два будут служить для закрепления проволок, а третье (нижнее) завинчено особым добавочным винтом. Что же касается до мастики, то она после нагревания легко совершенно очищается и, следовательно, оставляет шар совершенно нетронутым; притом ее применение позволяет легко переменять точки прикрепления на любых местах поверхности шара.[1] Правильно приготовленная из хорошо высушенных материалов (25 ч. воска, 100 ч. канифоли и 40 ч. прокаленной и просеянной красной окиси железа или мумии) и наложенная тонким слоем между совершенно сухими, едва прогретыми, а потом очень медленно охлаждаемыми поверхностями обычных металлов, при обыкновенных температурах (не выше 25° Ц), мастика способна до того прочно спаивать, что слой поверхностью в 15 кв. см (напр. круг диаметром в 45 мм) отрывается только при грузе более 50 кг. А так как латунные пластинки такого размера при толщине в 1.5 мм (что совершенно достаточно для прочности) весят лишь менее 20 г, то поправка на подобные добавки к весу около 50 000 г, какой будет свойственен золотому шару, может быть произведена со всею желаемою степенью точности.

Для прочного подвешивания столь больших масс, как те, которые предположены в наших наблюдениях, оказались наиболее доступными и подходящими по легкости и крепости такие стальные проволоки, которые употребляются для фортепьянных струн. Измерения, произведенные в Главной палате А. Н. Доброхотовым и его помощниками, в среднем результате (из нескольких наблюдений) дали для такой проволоки следующие числа для отношения между диаметром d в миллиметрах, весом p граммов одного метра проволоки и грузом P — в килограммах, производящим разрыв, совершающийся для этой проволоки лишь с незначительным остающимся предварительным растяжением:

d	0.25	0.52	0.67	0.80	0.95	1.10	1.25	мм
p	0.37	1.62	2.68	3.96	5.51	7.38	9.38	г
P	11	47	86	110	152	234	287	кг

Отсюда находим, что для обыкновенной фортепьянной проволоки:

P/p	30	29	32	28	28	32	31	$\frac{кг}{г}$

[1] Решающими будут еще не производившиеся наблюдения над влиянием на весь ход колебаний расстояния проволок и над прочностью прикрепления мастикою при долговременных колебаниях. Замечу, что первые наблюдатели, напр. Кондамин, прикрепляли волокна, на которых качали свои легкие шаровые маятники, простым приклеиванием к поверхности шара куска материи, к которой легко было прикреплять конец волокна, что во мне и возбудило мысль о прикреплении мастикою, давно мною найденною и исследованною (см. Д. Менделеев. Об упругости газов. 1875, стр. 69).*

* Сочинения, т. VI, 1939, стр 329. (*Прим. ред.*)

Неполное равенство частного P/p зависит не столько от небольших изменений, иногда встречающихся в диаметрах проволоки данного куска, т. е. одной вытяжки, сколько от неодинаковости степени закаливания не только проволок разных диаметров, но и частей проволоки одного куска; ибо та же проволока после отпускания, т. е. накаливания и медленного охлаждения, разрывалась от грузов меньше, чем P, в три и того более раза. Проволоки других металлов, как и отпущенные стальные, представили при испытании меньшую крепость, т. е. для них частное P/p оказалось меньшим, чем для фортепьянной проволоки. Так, например, алюминиевые проволоки диаметром в 1.0 и 1.5 мм, весом в 2.13 и 4.83 г на метр разорвались, подвергаясь значительному растяжению, от грузов в 14.3 и 34.8 кг, что дает частное $P/p = 6.7$ и 7.2, т. е. в среднем такая проволока примерно — при равном весе — в 4 раза слабее фортепьянной. Так как волокна и шнуры шелка, льна, пеньки и др. волокнистых веществ оказались — при равном весе — не только уступающими фортепьянной проволоке, но и подвергающимися растяжению от грузов, близких к разрывающим, то предполагается в наших наблюдениях преимущественно, если не исключительно, пользоваться фортепьянною проволокою разных диаметров. При подвешивании шара на 50 кг весом на двух проволоках, очевидно, достаточно — ради безопасности от разрыва — взять проволоки в 0.45 мм диаметром, предполагается же взять сверх того проволоки, в два и три раза более крепкие, преимущественно ради поверки поправок, вводимых в наблюдения и зависящих от весомости проволоки, как это можно понять и без дальнейших объяснений.

В заключение соображений, касающихся применения проволок для подвешивания груза маятника, считаю неизлишним присовокупить, что за наиболее подходящий материал для проволок, назначаемых для длинных маятников и для колебаний, длящихся сутками, я считал бы мало расширяющийся от переменных температур вышеупомянутый инвар Гильома, потому что при проволоках из этого материала все изменения длины, происходящие от временных перемен температуры в разных частях всей длины, были бы сведены к очень малым величинам. Но применить такие инварные проволоки в начинаемых наблюдениях Главной палаты повидимости нельзя, прежде всего потому, что в торговле нет такого большого разнообразия диаметров проволоки из инвара, какой легко доступен по отношению к фортепьянной проволоке; нашлись только, да и то благодаря содействию собрата по науке г. Гильома, товарища управляющего Международным бюро мер и весов, инварные проволоки сравнительно больших диаметров в 1.7 и 2.0 мм. А такие сравнительно толстые проволоки представили бы большой вес и большое

сопротивление (относительно колебаний в воздухе), а потому уменьшая один вид поправок — они увеличили бы ряд других. Притом, во-первых, испытания на разрыв (отношение P к весу метра p) дали для этой проволоки:

$$d = 1.7 \text{ мм}, \; p = 18.28 \text{ г}, \; P = 200 \text{ кг и } P/p = 10.8$$
$$d = 0.83 \; „ \; p = 4.41 \; „ \; P = 62.3 \; „ \; „ \; P/p = 14.1,$$

а это показывает, что относительно прочности инвар уступает взятой в опыты фортепьянной проволоке, для которой, как показано выше, P/p близко к 30, и, во-вторых, трудность получения больших количеств инварной проволоки разных желаемых диаметров (и следовательно разной крепости) не позволяет произвести опытов с проволоками разной толщины, что легко выполнимо для фортепьянной проволоки. По всему этому я решил остановиться предпочтительнее всего на этой последней, а другие применять лишь для опыта и в исключительных случаях.

Кроме проволок в некоторых случаях, а именно при очень легких грузах, предполагается пользоваться сырыми (сложными) размотанными шелковыми волокнами, потому что их крепость, гибкость, легкость и большая длина представляют немалые удобства. Такое шелковое волокно, известное в торговле под названием овгансина, полученное прямо с фабрики, представляет в 100 метрах длины вес 0.255 г и выдерживает груз до 69 г. Его относительная крепость, выраженная, как и выше для стальной проволоки (числом 30), равняется поэтому 27-ми, т. е. выше, чем для инвара, и очень близка по прочности к закаленной стали.

§ 5. **Поправка „на пустоту“.** В предшествующих параграфах уже неоднократно пришлось упоминать о поправках на длину и на время колебаний, потому что только после этих поправок оказывается возможным сделать из наблюдений над колебаниями физических маятников точные выводы о величине напряжения тяжести. Однако, не должно забывать, что самое устройство маятников, назначаемых для определения g, обусловлено стремлением уменьшить величину всяких поправок, за исключением поправки для приведения к пустоте, для которой одной g и считается истинным. Поправку для приведения к пустоте должно считать как при оборотных маятниках, так и при пользовании качаниями тяжелых шаров на тонких проволоках самою существенною и исторически самою сложною, а потому заслуживающею первейшего внимания. Совершенная ее необходимость видна уже из того, что при данной длине времена колебаний изменяются с плотностью, т. е. температурою, влажностью и давлением воздуха, а потому без этой поправки нельзя получить постоянных чисел для g в данных условиях географического положения места наблюдения. Обыкновенно поправку эту про-

изводят в данных для времен колебания, хотя по видимости правильнее вводить эту поправку прямо в величину напряжения тяжести, разочтенную для колебаний в воздухе, Если наблюденные L и T исправить при помощи поправок γ и τ во всех — кроме поправки на пустоту — других отношениях, то полученное значение дроби $\pi^2(L+\lambda):(T+\tau)^2$ можно назвать G — *напряжением тяжести в воздухе,* а истинное напряжение тяжести g будет $= G+\gamma$, где γ выразит поправку для приведения к пустоте. Таким образом получается основное равенство:

$$g = \pi^2 \frac{L+\lambda}{(T+\tau)^2} + \gamma,^1 \quad \ldots\ldots\ldots \quad (4)$$

в котором L и T определяются прямо по измерению или по наблюдению, а λ, τ и γ рассчитываются по весу и расстоянию от оси колебаний всех частей маятника, по размеру размахов и по плотности и др. свойствам окружающего воздуха, не говоря уже о поправках, свойственных всяким измерениям длин (на приведение к прототипу, на температуру и т. п.) и времен (на ход часов для приведения к среднему солнечному времени).

Прежде чем обсуждать существо и способы нахождения поправок λ, τ и γ, считаю неизлишним привести численный пример наблюденных L и T и введенных поправок, взяв случай единичного маятника (а не разностей для двух маятников разной длины или не оборотный маятник) и заимствовав числа из упомянутого в начале статьи собрания классических мемуаров, относящихся до маятников. Борда и Кассини в 1792 г. определяли длину секундного маятника (или g, так как длина секундного маятника $= g \cdot 0.1013212$, т. е. $g\pi^{-2}$) в Парижской обсерватории, пользуясь подвешенным на железной проволоке (длиною около 12 фут.) платиновым шаром, имевшим уд. вес 20.71 при 20°/20° (или *20.67* при 20°/4°) и весившим 9911 гранов (по видимости вес дан в воздухе), т. е. $= 526.42$ [2] г, что дает диаметр шара $=$ *36.50* мм при 20°. Время колебаний маятника определялось способом совпадений (коэнсиденций; способ этот найден в 1785 г.

---

[1] Должно заметить, что для выражения времен одного колебания очень часто определяют число колебаний в средние сутки, т. е. в 86400 сек. Если это наблюдаемое число колебаний в сутки назовем N и поправку, для него необходимую, ν, то очевидно, что $T+\tau = 86400/(N+\nu)$ и формула (4) получит вид $g = C(L+\lambda)(N+\nu)^2+\gamma$, где $C = \pi^2/(86400)^2$. Хотя в таком приеме есть свои удобства, но в этой статье далее приводимые расчеты и примеры выражены преимущественно в T сек.

[2] Числа, напечатанные здесь курсивными цифрами, разочтены мною по данным авторов. Все измерения авторов переведены мною в метрические единицы для удобства всякого рода сличений. Для перевода старых французских мер в метрические взяты общеизвестные отношения, помещаемые, например, в „Annuaire d. Bureau des Longitudes". Температуры везде даны по стоградусному термометру (Цельсия).

знаменитым славянином Босковичем), наблюдая совпадения с маятником часов, идущих по звездному времени, ход которых поверялся по наблюдению звезд, и по исправлении хода рассчитывалось число колебаний между совпадениями, по показанию числа секунд, протекших между ближайшими друг к другу совпадениями. Так, в первом (из 20) наблюдений, которое одно мы приводим, произошло 5 совпадений и по 4-м их промежуткам найдено, в среднем, что в средние сутки маятник делает *43305.80* колебаний. Число это исправлено, а именно, увеличено на 0.18 сообразно с среднею поправкою для приведения наблюдавшихся размахов к бесконечно малым, ибо при увеличении размахов (см. § 6) время одного колебания увеличивается. Таким образом в первом опыте определилось 43305.48 колебаний в сутки или время одного колебания в воздухе: $T+\tau = 86400/43305.48 =$ *1.995 123* сек. Длина маятника определилась в указанном опыте из следующих основных данных: 1) наблюдено в конце опыта, что расстояние от острия призмы до нижнего конца шара = 203952.2 частям платиновой (в 12 футов длины), предварительно изученной линейки, разделенной на части, подвешенной сверху и покрытой другою медною линейкою, служащею указателем температуры; 2) к наблюденной длине прибавлено 0.3 части, потому что расстояние (деления) частей линейки изучалось при горизонтальном ее положении, а в опыте она была подвешена за верхний конец; 3) от полученной длины отнято столько, сколько приходится на разность средней температуры, бывшей в опыте, от температуры (более высокой), при которой определена длина; получилось 203952.17 части; 4) отнято 937 частей, отвечающих по прямому измерению полудиаметру шара, и таким образом получено, что расстояние от точки подвеса до центра шара = 203015.17 частям вышеупомянутой линейки; 5) к полученному числу было прибавлено 1.73 части для того, чтобы найти расстояние от точки подвеса до центра качания, который (на основании учения механики о моменте инерции шара) лежит в этом случае ниже центра тяжести шара на $^2/_5$ от $\left(\frac{937}{203015.17}\right)^2$, т. е. на 1.73 ч.; 6) для нахождения действительного расстояния центра качания от точки подвеса от получающегося числа 203016.90 частей отнято 47.83 ч. на основании данных о длине и весе (= 13.79 гранов или *0.732* г) проволоки и 7) и 3.25 ч. по данным, определяющим момент инерции (— отнесенный к оси колебаний) цилиндрика, закрепляющего нижний конец проволоки на шаре. [1]

[1] Верхний конец проволоки был закреплен при опытах Борда и Кассини в подвеске, на которой закреплена призма. Эта подвеска, имея поверх призмы поднимающуюся на винте гайку (какая бывает в точных весах), приводится первоначально в такое состояние, чтобы сама по себе (без проволоки и шара) колебалась в такой же период, как маятник (как то обыкновенно делается и

После всех указанных поправок, долженствующих входить всегда, даже тогда, когда применяются маятники, состоящие из шара, подвешенного на проволоке, получилось расстояние центра качания от точки подвеса, или „приведенная" длина маятника равною 202965.82 частям мерной (платиновой) линейки при средней температуре опыта (16°.1). Но платиновая линейка была исследована и сравнена с туазом, служившим для измерения дуги меридиана и для установки метрической системы, при 0°, а потому должно узнать, каково было бы показание платиновой линейки, если бы она имела температуру тающего льда. Эту поправку узнать легко, потому что авторы для такого же температурного перевода, какой необходимо нам знать, получили 50999.75 из 50992.60, т. е. умножили на 1.000140, что дает коэффициент линейного расширения платины около 0.0000087, как и найдено во времена Борда. Следовательно в опыте длина маятника, выраженная делениями платиновой линейки, равнялась $202965.82 \times 1.000140 = 202994.24$ частям. Это и есть величина $L+\lambda$ или l, необходимая для определения g, или напряжения тяжести в воздухе. По отношению длины частей платиновой линейки (взятой при 0°) к общераспространенным мерам мемуар Борда и Кассини указывает, что 50999.60 частей линейки равны 440.5593 прежним французским линиям,[1] откуда, приняв туаз, или 864 линии, равным 1.9490366 м (как обыкновенно признают), видно, что 1 м равен *51316.36* частям взятой платиновой линейки, а потому „приведенная" длина маятника, или $L+\lambda$, по вышеописанному опыту равняется *3.955818* м. А так как время одного колебания, как показано выше, равно $T+\tau = 1.995128$ сек., то „напряжение тяжести в воздухе":

$$g-\gamma = G = \frac{\pi^2\, 3.955818}{(1.995128)^2} = 9.8312.^{2}$$

Чтобы перейти к пустоте, т. е. определить искомое напряжение тяжести g, или величину поправки γ, Борда и Кассини, как и Ньютон, довольствовались тем, что приняли в расчет потерю веса маятника в воздухе, хотя влияние воздуха выра-

---

до сих пор по предложению, если не ошибаюсь, Босковича), что избавляет от введения для нее поправки при нахождении „приведенной" длины маятника l.

[1] По смыслу мемуара Борда и Кассини несомненно, что указанное соответствие относится к тому, когда платиновая линейка имеет температуру 0°.

[2] Борда и Кассини вывели из совокупности всех 20 своих определений, введя все поправки, что длина секундного маятника = 440.5593 линиям, т. е. 0.9938269 м. Отсюда $g = 9.8087$. Деффорж (1889 г.), применяя многие улучшения, нашел длину секундного маятника на том же месте (Парижская обсерватория) равною 0.993060 м, а $g = 9.80999$; разность (для g она = 1.3 мм), по моему мнению, определяется исключительно улучшениями поправок. Взятый нами первый опыт дал Борда и Кассини число высшее, чем все остальные 19 опытов, которые доныне справедливо считают образцовыми.

жается не только в этом, но и в том, что часть его, как бы прилипая к маятнику, сопровождает его в колебаниях, что подметил уже Дю-Бюа (в 1786 г.), а также в том, что при движении всех частей маятника они встречают сопротивление воздуха, заставляя его уступать им место, а сами замедляют свое движение, да притом они сами и сопровождающий их воздух трутся об окружающий воздух. Этими влияниями не только определяется уменьшение размахов, но и время одного размаха или целого колебания изменяется, как это показали на опыте Дю-Бюа, Бессель, Себейн, Бэли и др., и что теоретически разбирали Пуассон, Стокс и др., хотя и поныне предмет этот нельзя считать окончательно выясненным во многих подробностях, особенно относительно влияния сопротивления воздуха на проволоки или стержни маятников. Что касается до поправки на пустоту, введенной Борда и Кассини, то она прямо определялась ими по отношению истинного веса маятника к его весу в воздухе, т. е. находилась чрез умножение G (или, что сводится к тому же, длины секундного маятника в „воздухе“) на $P/(P-p)$, где p есть вес вытесненного воздуха, а P есть вес маятника в воздухе. Так как объемы, отвечающие p и P, одинаковы, то вместо них можно ставить удельные веса, что однако не представляет особых удобств, если надо находить „средний“ уд. вес для разных материалов, из которых составлен маятник. Борда и Кассини приняли вышеуказанную дробь равною 1.000060, а так как вес шара, проволоки и др. частей маятника был около 550 г, а объем около 30 куб. см, то, во-первых, по указанному опыту, $g = 9.8312 \cdot 1.00006 = 9.8318$ и $\gamma = 0.0006$, а, во-вторых, что вес одного куб. сантиметра воздуха (при 16°.1 и давлении 28 дюйм. 2.8 линий) в опыте авторы приняли близким к 0.0011 г, а это недалеко от действительности, хотя правильнее принять число, близкое к 0.0012 г. Недостаточность указанной поправки однако не в подобных неточностях. В остальных 19 опытах,[1] давших вывод немного меньший, сущность дела оставалась такою же, как описано, и только троекратно изменялось положение мест прикрепления проволоки. Поправка γ без сомнения в действительности больше, чем принято авторами. На основании теоретических соображений Пуассон предложил увеличить ее в $1^1/_2$ раза, а наблюдения, произведенные Дю-Бюа, Бесселем, Себайном и особенно Бэли отчасти в воде и воздухе, а отчасти в воздухе и в атмосфере разных газов — при разных давлениях, т. е. при разных плотностях газовой среды, и отчасти

[1] Название „опытов“ придано мною определениям Борда и Кассини преимущественно потому, что сами авторы так („expérience“) называют отдельные наблюдения, произведенные без перерыва — пока размахи не станут чересчур малыми.

с грузами различных плотностей, показали, что нередко необходимая поправка почти в два раза превосходит вышеуказанную, а иногда — при сложной форме маятника и для трубчатых стержней — даже почти в три раза, в зависимости не только от плотности груза, но и от формы его самого, проволоки и прочего. Это большое увеличение „поправки на пустоту" зависит, как упомянуто выше, от того, что часть воздуха движется и перемещается вместе с маятником (Бэли даже старался определить количество прилипшего к маятникам различной формы массы воздуха) и от того, что воздух, как и всякая жидкость, обладает „внутренним трением", определяющим „вязкость". Различные наблюдения демонстрируют существование поправки на пустоту и дают возможность определять ее величину, преимущественно применяя наблюдения времен колебаний в разреженном пространстве, т. е. в воздухе при различных давлениях, наблюдения в разных жидкостях или газах и наблюдения в воздухе при одинаковых длинах и объемах маятников, но с грузами разной плотности. Последний способ, применявшийся очень многими (начиная с Ньютона и Дю-Бюа), по моему мнению, в принципе страдает тем, что при грузах одного объема, но различных удельных весов, значительно изменяется трение в точке подвеса, напр. на острие призмы, а потому в наших исследованиях предполагается произвести, при возможно одинаковых прочих условиях,[1] ряд наблюдений трех родов: *во-первых*, при одинаковых объемах грузов, имеющих очень явно различные плотности, начиная от золота (уд. вес около 19.2) до сплава канифоли с воском (уд. вес около 1.05), напр. из свинца (уд. вес около 11), чугуна (уд. вес около 7.2) и сплава, подобного тяжелому сургучу (уд. вес около 2.5); *во-вторых*, при одинаковых весах грузов различной плотности (напр. из золота, чугуна и сплава канифоли с воском и др.) и *в-третьих*, из данного материала при разных объемах и весах, напр. из чугуна при весе груза в 100, 50, 20 и 10 кг. Из первого ряда, где предполагаются сопротивления воздуха и веса вытесненного воздуха одинаковыми, разности в G будут определяться разностями веса гру-

[1] Многие условия, как, например, длина проволоки (при разных объемах), могут быть сохранены со всем старанием, но все же некоторые разности войдут — по необходимости — в каждый опыт, напр. различие длины от небольших перемен температуры, разности от перемены давления воздуха и т. п. Такие, во всяком случае очень незначительные, разности условий отчасти могут быть устранены посредством подсчета или приведения к равным условиям, если допустить для малых поправок справедливость существующих теоретических поправок, или, основываясь на опытах при искусственном изменении условий, напр. для поправки на перемену давления, основываясь на опытах в чугунной трубе (§ 2), где легко изменять давления, отчасти же окончательно исчезнут при расчете G, т. е. напряжения тяжести „в воздухе", по разности, как указано в § 2.

зов, а, следовательно, трением в оси колебаний и разностями плотностей (выше было указано, что γ определяется уд. весом груза), а потому, взяв за переменный аргумент удельные или абсолютные (при равных объемах — это вправе) веса и разочтя, каково будет G при плотностях бесконечно большой и равной нулю, можно получить чисто эмпирическое понятие о напряжении тяжести как тогда, когда трение на оси равно нулю, что соответствует случаю нулевого груза, так и тогда, когда сопротивление воздуха или, правильнее, „поправка на пустоту" будет нулевою, т. е. когда уд. вес груза будет очень велик и P (вес груза в пустоте) можно принять — в пределах точности наблюдений — равным $P-p$ (для груза в воздухе). В одном из указанных пределов исключается трение, а остается сопротивление, а в другом — наоборот. Во втором ряде наблюдений, когда абсолютные веса останутся те же, а меняются только уд. веса грузов, очевидно, что трение на оси одинаково участвует во всех G и их разность определится только разностями чистой поправки на пустоту, и потому, изменяя уд. веса грузов эмпирически, конечно, экстраполированием, найдем правильные значения G опять как при плотности нулевой, так и при бесконечно большой. Последняя даст G, освобожденное от чистой поправки „на пустоту", а в комбинации с данными первого ряда даст как поправку на трение в оси колебаний, так и поправку „на пустоту". Но так как при таких расчетах из первого (равные объемы) и второго (равные веса) рядов неизбежны некоторые допущения при экстраполированиях и предполагается влияние трения на оси, доныне многими отвергаемое, то для уверенности вывода необходим третий ряд, в котором плотности груза остаются одни и те же, а меняется только объем или вес груза. Если бы та поправка γ в G, которую обыкновенно называют „поправкою на пустоту", определялась исключительно воздухом и отношением его плотности к плотности материала маятника, то, сохраняя форму маятника и его плотность, можно было бы ждать одинаковости G в наблюдениях третьего ряда, если плотности останутся те же, но есть уже несомненные данные, напр., у Бэли, о том, что выводы при равной плотности и при разных грузах различаются гораздо больше, чем может изменяться плотность воздуха. Ныне это понимается как различия, зависящие от меры поверхностей грузов или проще от внутреннего трения и сопротивления воздуха. Не думая отрицать эти последние влияния, я желал бы только, чтобы наши опыты и наблюдения выяснили меру участия трения на оси колебаний, и полагаю, что подробное обсуждение указанных трех рядов наблюдений доставит для того опытные данные, которых ныне, при всей обширности сделанных работ, еще недостает. Если я не вхожу в подробности расчетов, относя-

щихся к указанным трем рядам наблюдений (при равных объемах, весах и плотностях), то имею в виду при том три соображения. Во-первых, в течение опытов, число которых, как видно, предположено значительным, могут и, вероятно, должны возродиться многие новые, теперь не имеющиеся в виду соображения, и потому входить в подробности ныне считаю рановременным. Во-вторых, о мере участия трения на оси колебаний, всего сопротивления воздуха и потери веса при колебании в воздухе — предполагается судить не только по совокупности трех вышеуказанных рядов наблюдений, но и различными другими способами, особенно же при помощи наблюдений в разреженном воздухе и в разных газах и жидкостях, а описание всех имеющихся здесь начинаний и предположений чересчур усложнило бы эту вступительную статью. В-третьих, и это быть может важнее всего, лишь обсуждение опытных рядов чисел может указать, что можно и должно будет делать с выводимыми G (напряжение тяжести в воздухе), когда мы прибегнем к способу разностей (§ 2), так как в них, по видимости, исчезнет поправка на трение оси, равно как и некоторые другие неточности. Кроме всего этого, очень важна будет оценка степеней точности получаемых данных, чтобы суждения о мере опытом указываемых поправок не выходили из пределов точности или вероятности результатов, ибо при большой длине маятников все поправки малы.

Во всяком случае, однако, основным или, по крайней мере, важнейшим методом для суждения о действительной „поправке на пустоту" доныне остаются наблюдения в разреженном воздухе, сущность которых сводится на допущение пропорциональности между величиною поправки и весом определенного объема воздуха. Пусть во время наблюдения в воздухе, когда получено G, исправленные показания барометра, термометра и гигрометра указывают на то, что литр воздуха весит e г и пусть тот же маятник даст G_1 в разреженном пространстве, когда показания манометра, термометра и гигрометра дают вес литра воздуха e_1. По существу дела признается, что $g = G + ce$, а также $g = G_1 + ce_1$, откуда коэффициент $c = \frac{G_1 - g}{e_1 - e}$. Такое заключение совершенно допустимо, пока речь идет только о поправке на вес вытесненного воздуха, но становится сомнительным, когда вслед за Бесселем, Пуассоном и др. в одну и ту же поправку включается, сверх потери веса, еще и все сопротивление воздуха, зависящее не только от формы маятника, но от внутреннего трения воздуха, своеобразно изменяющегося при перемене давления, температуры и влажности, вовсе не пропорционально плотности, как, например, видно уже из того, что внутреннее трение водорода, как ныне известно, больше внутреннего трения

воздуха при равенстве плотностей. Здесь надобно собрание многих новых наблюдений, напр. при постепенно изменяющемся давлении, сохраняя температуру, при постепенно изменяющейся температуре, сохраняя давление, при разных количествах влаги и т. п. Чугунная труба, упомянутая в § 2, может дать возможность производить подобные наблюдения, но меня при подготовке к опытам немного устрашает потребность производства многих побочных точных исследований и, если первые опыты окажутся не позволяющими отчетливо отделить друг от друга ныне описанные поправки — на трение в месте подвеса, на плотность воздуха и на его сопротивление от всяких иных причин, особенно от внутреннего трения, то мне кажется наиболее практичным сперва ограничиться уверенным определением G (напряжение тяжести „в воздухе"), приведя лишь его к определенным условиям давления и температуры (едва ли удастся сделать это и для влажности), и лишь после того особым рядом наблюдений исправить найденное G в остальных отношениях, которые означены выше чрез γ. Поэтому нахождение поправки „на пустоту" и „на трение в месте подвеса" должно составить предмет особой статьи, содержание которой определится точнее, когда первые направленные сюда наблюдения (с оборотным маятником разного веса, с метрономами разного устройства в разных газах и жидкостях и т. п.) дадут те или иные ответы. На основании сказанного, высказав *лишь* некоторые их своих предположений по отношению к поправке γ, т. е. к переходу от G к g, я считаю необходимым перейти к остальным поправкам, которые должно ввести в наблюдаемые длину и время, чтобы получить величину G напряжения тяжести в воздухе.[1]

§ 6. **Поправка на время колебаний или на число колебаний в сутки.** Так как в разреженном пространстве всякий маятник в данное время делает больше колебаний, чем в воздухе, т. е. колеблется скорее (напр. у Бэли платиновый шар с $1\frac{1}{2}$ дюйм. диаметром делал в воздухе, при среднем давлении около 30.2 дюйм., около 86734.5 колебаний, а в разреженном пространстве, при среднем давлении около 1.2 дюйм., около 86739.4 колебаний в течение суток, т. е. одно колебание в первом случае отвечало 0.996144 сек., а во втором 0.996087 сек., то поправку „на пустоту" обыкновенно производят во времени, но по причинам, изложенным выше, я считаю наиболее рациональным обыкновенно ее включать прямо в самое напряжение тяжести вместе

[1] Над расчетом величины чистой поправки „на пустоту" в случае шара, подвешенного на проволоке, не считаю надобным особо останавливаться, во-первых, потому что все необходимое изложено в мемуарах Бэли и Стокса (помещенных в V томе мемуаров, упомянутых во вступлении) и с тех пор не усовершенствовано, а во-вторых, потому что поправка на трение в месте подвеса *неотделима* от поправки на пустоту, а тут все пока еще неизвестно.

с поправкою на трение в точке подвеса, если из данных единичного опыта прямо рассчитывается g. Это возможно тем более, что все виды поправок можно относить к наблюдаемому в воздухе напряжению G, или к длине L, или к времени T. Но если g определяется по разности (§ 2) показаний двух маятников различной длины, проще и лучше всего присоединять поправку на пустоту к поправке на время, что не вызывает никаких особых усложнений, а потому об этом далее не будет говориться.

Затем следует заметить, что времена колебаний при определении длины секундного маятника или напряжения тяжести очень часто — по заведенному обычаю — выражают числом N колебаний в средние астрономические сутки, а так как в сутках 86400 секунд, то частное из этого числа на N ($86400/N = T$) прямо дает время одного колебания в секундах, а это число удобнее схватывается сознанием и отвечает привычному виду формул для маятников. Так как счет числа колебаний в сутки имеет, однако, некоторые удобства, то в нашем изложении применяются оба приема и чрез ν означается поправка в числе N. При его применении основная формула (4) сводится к виду:

$$g = \frac{\pi^2 (L+\lambda)(N+\nu)^2}{(86400)^2} + \gamma = 10^{-12} \cdot 1322.124\,(L+\lambda)(N+\nu)^2 + \gamma, \ldots \quad (5)$$

где g, γ, L и λ выражены в одних и тех же единицах длины. Очевидно затем, что, зная поправку ν на число размахов в сутки N, легко определить поправку τ на время одного размаха T и обратно. Мы будем затем изредка придерживаться выражения числа колебаний N, не столько потому, что это принято большинством исследователей, сколько по той причине, что большинство основных наблюдений, предполагаемых в Главной палате, будет длиться более суток, даже быть может более двух суток, и суточные определения в наших опытах быть может [1] не представят, как то бывает обыкновенно, перехода от долей к целому, а ответят или действительности, т. е. счету числа колебаний в продолжение целых суток, или будут представлять

[1] Предвидится одно существенное затруднение, которое однако, вероятно, удастся так или иначе устранить. Оно при длинных маятниках состоит в том, что они даже при подвешивании на двух проволоках, как на проволоке и призме, после некоторого времени колебаний в определенной плоскости начинают, так сказать, „вилять", т. е. уклоняться и описывать продолговатые эллипсы или восьмерки. По всей видимости это зависит от тех же причин (вращения земли), от которых происходят уклоны однопроволочных тяжелых маятников Фуко, и я полагаю, что в обычных маятниках то же явление существует, но мало заметно по причине малых размеров. Скольжение в маятниках ножа по площадке, вероятно, отчасти определяется той же причиною. Для устранения этого затруднения предприняты особые опыты, относящиеся к влиянию перемены мест прикрепления проволок к шарам, к влиянию параллелизма или расходимости — к верху — проволок, влиянию веса шаров и величины начального размаха, влиянию разных способов приведения маятника в движение, раскачиванию воздухом и т. п. Если не удастся на долгие сроки сохра-

среднее из двух или трех чисел, отвечающих целым суткам, или, наконец, представят переход от большого срока к меньшему. При таких длинных маятниках, как у нас, при которых один размах происходит в 4 или 6 сек., в счете числа колебаний даже на сутки нельзя сделать таких погрешностей (пропуск или прибавка одного или двух размахов), какие легко возможны при одно- и полусекундных маятниках, если по временам, напр. чрез каждый час, определять длительность десяти размахов. Если же около начала суток и около их конца чрез определенные числа минут определять абсолютные (по хронометру) времена прохождения чрез положение равновесия—по нескольку раз, то число колебаний N в сутки в среднем выводе определится со всею желаемою точностью.

После этих предварительных замечаний обратимся к расчету той степени точности Δt в определениях времен, какая требуется для того, чтобы в напряжении тяжести g погрешность Δg не была (в зависимости от указанной причины) более десятой доли миллиметра или, иначе, найдем величину погрешности $\pm\Delta(t)$ приняв $\pm\Delta g = 0.0001$, если g выражено в метрах. Дифференцируя равенство (1) по отношению к t и исключая l, получаем очень простое выражение:

$$\pm\Delta g = \pm\frac{2g}{t}\Delta(t),$$

а приняв g близким к 9.8 и полагая $\Delta(g) = 0.0001$, имеем:

$$\pm\Delta(t) = \mp 0.0000051\, t \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

Это показывает, что чем больше время одного размаха t, тем — при прочих равных условиях — бо́льшую погрешность $\Delta(t)$ в определении времен можно допустить при достижении данной степени точности в определении g, т. е. и здесь длинные, медленно колеблющиеся маятники представляют свои выгоды.[1]

нять должную правильность в плоскости колебания, придется сокращать сроки единичных опытов, так как и при часовой длительности наблюдений, с помощью фотографической записи, можно надеяться на достижение желаемой точности. Наибольшую трудность, по моему мнению, все же представляют поправки „на пустоту" и „на трение по оси качаний". В эту сторону наше внимание наиболее направляется в предварительных опытах, приступ к которым отчасти уже сделан.

[1] Если в основном уравнении (1), произведя дифференцирование, определить погрешность $\Delta(g)$ в зависимости от погрешностей $\Delta(l)$ и $\Delta(t)$, исключив при первом члене t, а при втором l, то получится очень простое выражение $\pm\Delta(g) = \pm\frac{g}{l}\Delta(l) \mp \frac{2g}{t}\Delta(t)$, которое совершенно явно показывает, что погрешность в определении уменьшается не только с увеличением длины, но и с увеличением времени одного размаха t, что и положено в основание всех соображений о предполагаемом определении напряжения тяжести в Главной палате.

Так как для основных наших маятников t=от 2 сек. (при l около 4 м) до 6 сек. (когда l около 36 м), то требуемая точность времен одного размаха $\Delta(t)$ должна быть от 0.00001 до 0.00003 сек. Если абсолютные времена прохождения маятников чрез положение равновесия будут, как и число колебаний, определяться в течение 24 часов, то наши основные маятники совершат в это время от 43200 до 14400 размахов, и если в определении абсолютной разности времен сделаем погрешность даже в $^1/_4$ сек., чего ждать нельзя, потому что все надлежащие меры погрешностей вычислений (как отчасти объяснено далее), то и тогда $\Delta(t)$ будет не более как от 0.000058 до 0.000017 сек., т. е. для длинного маятника достигается желаемая точность. Но указанную точность разности абсолютных времен легко увеличить в желаемой мере, определяя как при начале, так и в конце суток времена не одного, а многих прохождений, а повторяя такое определение чрез известное число пропущенных колебаний, не говоря о длинных маятниках, даже для 2-секундного или 4-метрового маятника нельзя сделать пропуска даже одного или двух колебаний за целые сутки, если по временам, напр. чрез 1 или 2 часа, делать повторные отчеты прохождений. Наконец, известно, что в обычных полусекундных маятниках достигается, при помощи способа совпадений (коэнсиденций), устраняющего неточности в числе размахов и впервые точно описанного Босковичем; точность до десятимиллионных долей секунды на один средний размах, когда маятник колеблется лишь несколько часов, а у нас при суточной продолжительности колебаний, очевидно, и помимо способа коэнсиденций легко достигнется желаемая точность, которая необходима нам лишь в стотысячных долях секунды.[1]

Что касается до поправок на ход хронометра, по которому будут вестись отчеты времен, то в этом отношении Главная палата уже обеспечена в должной мере, так как нашему учреждению поручено наблюдение точных времен, для чего оборудованы астрономические наблюдения на башне, описанной в § 1, постоянно уже производятся наблюдения над прохождением звезд, имеются астрономические часы по звездному и среднему временам, хронографы и приспособления для передачи поправленных времен при помощи тока. Не вдаюсь в описание многих новейших усовершенствований, введенных Ф. И. Блумбахом в Главной палате для получения и передачи точных времен, потому что Ф. И. Блумбах в особой статье „Временника" предполагает описать все примененные для того способы, особо выработанные для часов Зимнего его императорского величества

[1] Притом, ради объективности показаний, предполагается применить к отчету времен прохождения не только записи на быстро двигающихся хронографических лентах, но и на фотографических пластинках.

дворца и для часов при министерстве финансов, так как то и другое из указанных мест подземными кабелями уже соединено с регулируемыми по звездам, примечательнейшими часами работы известного мюнхенского исполнителя д-ра С. Рифлера в 1902 г. Точность суточного хода этих часов, на основании многочисленных наблюдений, оказалось возможным довести до сотых долей секунды, как будет показано в статье Ф. И. Блумбаха. Электрическая передача сигналов таких времен к местам наблюдения качаний маятника позволяет прямо пользоваться точными временами, а могущие быть поправки введутся непосредственно в получаемые из опыта числа T или N. Уверенность в этом полная.

Гораздо более может возбуждать вопросов и осторожности поправка на величину размахов или для приведения наблюденных времен к бесконечно малым размахам. Прямой опыт легко убеждает в том, что с уменьшением размахов их времена T сокращаются или число размахов в сутки N увеличивается. Пикар, это усмотревший на деле, как и Кондамин, Брадлей и другие исследователи середины XVIII века довольствовались тем, что наблюдали очень малые размахи, и хотя Д. Бернулли в 1747 г. дал формулу для приведения наблюдаемых времен размахов T' к временам T бесконечно малых размахов:

$$T = \frac{T'}{1 + \frac{1}{4}\sin^2\frac{\alpha}{2} + \frac{9}{64}\sin^4\frac{\alpha}{2}}, \quad \ldots\ldots\ldots (7)$$

где α есть угол отклонения от вертикали (или полуразмах), но только знаменитый Боскович в 1785 г., а затем Борда и Кассини применили эту формулу к расчету. Сущность этой формулы показывает, что изохронизм (равенство времен размахов или уклонений или полных колебаний, которые $= 4\alpha$) не существует на деле даже для „математического" маятника, и приближение к нему наступает только тогда, когда дуги размахов настолько малы, что знаменатель вышеуказанной дроби—в пределах точности отсчетов—не отличается от единицы. Если за такой предел считать миллионные доли секунды времени, то надо, чтобы уклоны были не более 10′ по дуге. При $\alpha = 10'$ или, когда размах 20′, знаменатель предшествующей дроби $= 1.0000021$, т. е. поправка лишь настолько изменит время размаха, что это не повлияет на те десятые доли миллиметра в g, которые мы желаем определить с уверенностью. А так как наибольшие размахи, которые мы предполагаем применять в наблюдениях, будут около 1°, т. е. $\alpha = 30'$, а тогда поправка на время одного раз-

[1] В подлиннике опечатка $\frac{\alpha}{4}$. (*Прим. ред.*)

маха не превосходит 0.000005, а даже для 4-метрового маятника по выше поставленному условию требуется точность $\Delta(t)$ лишь до[1] 0.00001 сек., то при предполагаемых исследованиях можно, строго говоря, совершенно не вводить поправок для приведения к бесконечно малым размахам. Но все же их предполагается вводить не только потому, что это обыкновенно производится, но и для того, чтобы довести точность до возможного предела во всех отношениях. Поэтому далее, хотя вкратце, рассматривается вся упомянутая поправка.

Однако, здесь нельзя не остановить внимания на том, что важнее всего получить из опыта убеждение в справедливости поправки, разочтенной по приведенной формуле, так как она оказалась неудовлетворительною не только при размахах в несколько градусов, но и при таких малых размахах, как в весах. Поэтому предполагается сличить времена (число размахов) качаний длинного (напр. в 22 м) маятника при размахе около 2° (т. е. более того, что у нас будет допускаться), около 1° и при наименьших возможных размахах, перемежая наблюдения через определенное время, напр. через час, и достигая перемены величины размахов искусственными средствами, напр., при помощи дутья воздуха. При этом, надеюсь, можно будет найти эмпирический закон поправок для приведения к бесконечно малым размахам или к действительному изохронизму. Когда организация наблюдения времен будет закончена, с таких определений придется начать дело по той причине, что до сих пор, сколько мне известно, подобных опытов еще не производилось для маятников при небольших их размахах.

Но пока есть уверенность в применимости теоретической формулы (7), выведенной Д. Бернулли для математического маятника, к физическому маятнику, не излишне рассмотреть способ пользования ею для предстоящих наблюдений, когда размахи не превосходят 1°, много что $1^1/_2°$, т. е. когда можно довольствоваться в знаменателе лишь одним членом с $\sin^2\frac{\alpha}{2}$, пренебрегая прочими по их ничтожному значению, тогда:

$$t=\frac{T}{1+\frac{1}{4}\sin^2\frac{\alpha}{2}},$$

если T исправлено уже во всех иных отношениях. Так как знаменатель, судя по сказанному выше, при малом α всегда мал, то справедливо допустить:

$$t=T+\tau=T\left(1-\frac{1}{4}\sin^2\frac{\alpha}{2}\right),$$

---

[1] В подлиннике опечатка „до t^n. *(Прим. ред.)*

а потому τ всегда отрицательная величина:

$$\tau = -\frac{1}{4} T \sin^2 \frac{\alpha}{2}.$$

Для дальнейшего упрощения этого выражения смело можно, во-первых, заменить синус дугою, полагая при малых углах синус равным дуге (при радиусе = 1), во-вторых, вместо дуги взять отчет размахов по шкале, которая представлена будет у нас, как и обыкновенно, линейкой, разделенной на миллиметры, начиная от нуля. Наблюдены будут два деления этой шкалы, показывающие крайние точки, до которых достигнет нить, или иной знак на колеблющемся грузе или на проволоке, его поддерживающей. Назовем разность этих крайних показаний чрез m, что и выразит в миллиметрах величину размаха (точнее величину удвоенного синуса полуразмаха). Величина α, или отклонение от вертикали, равна очевидно $m/2$. Если чрез L' означим в миллиметрах расстояние шкалы от точки подвеса маятника, то угол $\alpha/2$ ответит дуге $m/4L'$ и $\sin\frac{\alpha}{2}$ можно заменить этою дугою,[1] а его квадрат будет $= (m/4L')^2$, а потому:

$$\tau = T\frac{m^2}{(8L')^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (8)$$

Здесь величины T (время одного размаха) и L' (расстояние шкалы от точки подвеса или оси колебаний) прямо даются опытом, но так как T выводится из числа q — многих протекших колебаний и из длительности времени всей суммы этих колебаний, то в это время колебания изменялись в своей величине от начального размаха m_0 до конечного m_1 и величина m должна, строго говоря, выражать среднюю величину всех размахов или их сумму, деленную на q. Для наших определений, когда вся поправка τ очень мала, можно, не выходя из возможных пределов точности (выше мы видели, что они близки к $\pm$ 0.00001 сек.), принять m равным $\frac{1}{2}(m_0 + m_1)$; или принять $\log m$ равным полусумме $\log m_0 + \log m_1$,[2] но когда уклонение и размахи велики,

[1] Синус 1° = 0.017453, а при радиусе, равном 1, длина полуокружности, или 180 градусов, — π = 3.14153, величина же $\alpha/2$ у нас будет не более $^1/_4$ градуса.

[2] Например, для первых 10 приведенных далее размахов весов m_0 = 159.6, m_1 = 127.3, а истинное среднее m = 142.45, среднее арифметическое из m_0 и m_1 = 143.45, а среднее логарифмическое = 142.54, и это ближе к делу, потому что показывает величину срединного размаха, если бы размахи убывали с постоянным декрементом. Если ради примера изойдем из нулевого размаха 384.70 мм и примем d = 1.005, то 10-й размах будет 365.98 мм, а 20-й 348.17 мм и среднее из всех 21 размахов будет = 367.10 мм, а среднее арифметическое = = 366.435, среднее же логарифмическое 365.98, т. е. = 10-му размаху и менее действительного среднего, как и арифметическое среднее. В нашем случае, когда дело идет о поправке τ при малых размахах, вполне можно довольство-

очевидно, должно найти m по m_0, m_1 и q, что поныне, строго говоря, сделать нельзя, потому что истинный закон изменения величины размахов неизвестен, и допущение закона постоянства логарифмического декремента ныне нельзя признавать, хотя действительность лишь незначительно уклоняется от этого допущения. Для выяснения дела беру пример из исследований над колебаниями весов (Менделеев. Опытное исследование колебания весов, II, 1889, стр. 37), когда были по порядку записаны элонгации (показания шкалы) 126 размахов. Не приводя самих записей, даю первые 10 размахов полностью, а потом через 10 размахов и начиная счет после нулевого размаха в 159.6 мм. Между каждыми двумя соседними размахами приведен декремент d, который получается или по разности логарифмов, деленной на число колебаний, или прямо через деление данного размаха на следующий. По понятию о декременте он постоянен, но как видно здесь и в других случаях, при надлежащей точности отчетов и правильности колебаний всегда декремент последовательно уменьшается. Так, напр., прямо наблюдено на весах:

№ размаха исходный	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$m = 159.63$	155.3	151.1	147.2	143.6	140.1	136.6	133.4	130.4	127.3
Декремент d =	1.028	1.028	1.027	1.026	1.025	1.025	1.024	1.024	1.023

№ = 10	20	30	40	50	60	70
$m = 124.3$	99.3	80.9	57.0	55.6	46.6	40.7
d =	1.023	1.021	1.019	1.019	1.018	1.014

Средний декремент для 10 первых размахов ($d = 1.0256$) еще можно было бы признать постоянным, если бы наблюдения были менее отчетливы и не показывали бы постоянного уменьшения декремента. По всей видимости убыль декремента продолжается до прекращения размахов, но и тогда декремент не становится равным единице. Убыль эта не пропорциональна числу размахов, т. е. величина декремента не выражается по отношению к числу размахов прямою линиею, как видно из совокупности известных мне данных, но допущение такого прямолинейного изменения составляет второе приближение (если постоянство d есть первое), во множестве случаев достаточное для обычных степеней точности наблюдений. Точно такое же непостоянство декремента, именно его постоянная убыль по мере уменьшения размахов, замечается при маятнике, но здесь уже невозможно проследить целые ряды размахов, потому что они быстро следуют друг за другом, убывают много медленнее, чем у весов

ваться допущением: $m = {}^1/_2\ (m_0 + m_1)$, и если далее останавливаюсь на предмете, то лишь ради его самостоятельного интереса.

(т. е. декремент маятников ближе к 1, чем у весов), и наблюдения пришлось бы продолжать очень долго для того, чтобы убедиться в непостоянстве декремента. Вместо этого, вследствие почти полного изохронизма, при маятниках очень удобно определять размахи (или лучше брать среднее из трех соседних размахов) чрез известные промежутки времени и тогда, зная среднюю (хотя и приближенную) длительность размаха, можно иметь точное понятие об изменении декремента, потому что число размахов в избранном промежутке времени будет известно. Для примера возьму из предварительных наблюдений, произведенных в верхней трубе (§ 1) А. А. Ивановым через каждые полчаса, 6 начальных размахов длинного маятника, качавшегося гораздо более суток, подвешенного на двух проволоках и уже представлявшего правильность хода — без особых уклонов в стороны.

Время отчета	11 ч. утра	11 ч. 30 м.	12 ч.	12 ч. 30 м.	1 ч.	1 ч. 30 м.
Величина размаха	565.6	491.6	431.4	383.5	343.5	309.4
Декремент		1.000381	1.000357	1.000320	1.000298	1.000285

Для расчета декремента принято, что в промежутке между двумя наблюдениями происходит 368 размахов, потому что длительность одного размаха оказалась близкою к 4.89 сек. Если же дан исходный размах m_0 и известно, что чрез q размахов (напр. здесь 368)[1] получается m_1, то средний декремент на сравнительно краткое время можно с точностью определить по равенству:

$$\log d = \frac{\log m_0 - \log m_1}{q}, \text{ ибо } m_1 = \frac{m_0}{d^q}.$$

Из полученных чисел очевидно, что хотя декремент и очень мал по отношению к каждому размаху, но он все же правильно убывает со временем и с величиною размахов. Примерно, через сутки он не более 1.000090. Отыскание закона убыли размахов или их декрементов — в зависимости от условий (напр. длин, сопротивлений, массы и т. п.) составляет одну из побочных задач, которые мне не хотелось бы упустить при определении напряжения тяжести в Главной палате, потому что при этом будет много случаев сделать соответственные наблюдения. [2]

Итак, помимо поправки на приведение к пустоте и на ход часов, которыми определяются времена, поправка „на время" т

[1] В подлиннике „368-м". *(Прим. ред.)*

[2] При исследовании колебания весов я получил убеждение в том, что убыль декремента нельзя выразить с достаточной точностью ни прямою, ни кривыми 2-го порядка по отношению к числу размахов, и мне кажется, что убыль декремента идет по такой же асимптотической кривой, как и убыль самых размахов.

(в выражении $t = T + \tau$) всегда для приведения к размахам бесконечно малого размера отрицательна и:

$$\tau = -T\left(\frac{m}{8L_1}\right)^2, \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (9_1)$$

а в наших определениях с длинными маятниками, когда размахи не более 1°, эта поправка ничтожно мала и в ней можно принимать:

$$m = \frac{m_0 + m_1}{2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (9_2)$$

§ 7. **Поправка на длину.** Длиною маятника называется расстояние от точки подвеса или до нижней точки груза маятника, или до его центра тяжести, или до его центра качания, т. е. до той точки маятника, при подвесе за которую он колебался бы в то же время, как при данной точке подвеса. Для наших маятников, состоящих из шаров, прикрепленных на конце проволоки, мы придерживаемся среднего определения, т. е. чрез L означаем вертикальное расстояние от точки (или уровня) зажима проволоки или от острия призмы, на которой подвешен маятник, до центра шара. Эта длина L реально определится, зная всю длину—до нижней точки шара—за вычетом полудиаметра шара и, при длинных маятниках, тонких проволоках и тяжелых шарах, столь близко подходит к длине синхронического математического маятника (или к расстоянию от точки опоры до центра качания), что поправка ее, или λ в $l = L + \lambda$, сравнительно невелика. Считаю излишним останавливаться долее (§ 1) над способами определения длины L и говорить о поправке этой длины в отношении температурных изменений, потому что предмет этот сам по себе простой, не содержит каких-либо особых трудностей при средствах, имеющихся в Главной палате, но считаю необходимым, но и то лишь вкратце, остановиться, во-первых на степени точности Δl в определении длины и, во-вторых, на расчете суммы поправок, образующих λ.

В наших определениях g желательно достичь такой точности, чтобы погрешность $\Delta(g)$ была не более как в десятых долях миллиметра. А так как по (2) зависимость от $\Delta(l)$ определяется условием:

$$\pm \Delta g = \mp \frac{g}{l} \Delta(l), \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (10),$$

а g близко к 9.82 м, то, полагая, ради примера, $\Delta(g) = \pm 0.0001$ м, получим выражение $\Delta(l)$ в миллиметрах (а l в метрах):

$$\Delta(l) = \pm 0.011\, l.$$

Если, как то ныне часто делается, $l = 1$ м—погрешность в измерении длины должна быть не более 0.011 мм, что при современном состоянии измерений не представляет никаких труд-

ностей. Если (§ 2) длина маятника будет 4 м или 20—40 м, тоже нельзя ждать погрешностей в определении длин, превосходящих указанный предел, конечно, если для того будут приложены надлежащие средства. Это соображение приведено мною ради того, чтобы ясно показать, что существующие доныне разноречия в определении g, достигающие миллиметров, зависят не столько от неточностей в определении длин, сколько от поправок „на пустоту", „на трение" и „на время", особенно же от двух первых. Здесь, однако, необходимо обратить внимание на то, что для маятников, качающихся не на призмах, а на зажатых проволоках, истинная длина L, быть может, менее расстояния от места зажима до центра шара, потому что неизвестно подлинное место, около которого происходят колебания. Это обстоятельство составляет одну из причин того предпочтения, которое ныне дают маятникам с призмами.[1] Можно бы полагать однако, что способ разностей (§ 2) вполне устраняет сомнения, здесь могущие существовать, но при нем является возможность предполагать, что при данных проволоке и грузе место перегиба, около которого происходят колебания, изменяется с длиною проволоки или маятника. Поэтому, в конце концов, между предварительными определениями мне кажется необходимым сравнение выводов при употреблении призм с выводами, полученными при зажатых проволоках как разной длины, так и разной толщины и гибкости. Поэтому опять видно, что для уверенного суждения приходится во многих отношениях сделать целую кучу точных предварительных наблюдений, которые однако дадут свои значения g; из сличения же их, надо думать, получим не только объяснение и возможность устранения несогласий, но и пределы неустранимых погрешностей, что более всего и желательно узнать.

Перейдем теперь к расчету поправок λ — на длину.

Принцип этих поправок установлен Гюгенсом, Яковом, Иваном и Данилом Бернулли, Эйлером и др. знаменитыми геометрами и сводится к тому, что: *разделяя сумму моментов инерции—по отношению к оси колебаний—частей физического маятника на сумму статических моментов тех же частей, получим длину l изохронного математического маятника*, т. е. такого,

[1] До сих пор, сколько мне известно, еще не было определено различие показаний маятников с зажимами и с призмами и нет даже приближенного представления о расстоянии между точкою зажима и тою, около которой происходят в зажимных маятниках колебания. Применяя такие маятники разной длины, заставляя их с одними и теми же грузами колебаться на проволоках разной толщины, пользуясь в то же время как маятниками на призмах, так и Бесселевским приемом разностей (§ 2) и производя во всех случаях все должные поправки (в том числе и на трение, если будет возможно), я надеюсь можно будет решить и этот вопрос, который должно считать в числе многих, еще не решенных (опытным путем) для физических маятников.

который делает размахи в такое же время t, как и физический маятник. Это частное и будет искомое l, или расстояние от центра качаний до оси подвеса или колебаний, а так как по нашему обозначению $l = L + \lambda$, то поправка на длину $\lambda = l - L$. А так как l всегда более расстояния центра тяжести всей системы маятника (подвеска, стержень и груз) от точки подвеса, а оно менее L, то разность $l - L$ есть величина положительная или отрицательная, как видно и по прямому опыту[1] и по расчету, далее приводимому.

У маятника, состоящего из шара, подвешенного на проволоке, зажатой в точке подвеса, только три части: шар, проволока и та посредствующая часть, при помощи которой проволока прикрепляется к шару. Означим их веса: P, p, и p_0, а расстояние их центров тяжести от оси качаний (точки закрепления) чрез L (как означено выше), l_1 и l_0. Если R есть радиус шара (конечно в тех же единицах, какие взяты для расстояний) и шар состоит из однородного материала, т. е. геометрический центр и центр тяжести совпадают,[2] момент его инерции по отношению к центру его тяжести, как известно, равен $^2/_5\ PR^2$, а по отношению к оси качаний равен $^2/_5\ PR^2 + PL^2$, статический же момент шара будет PL. Если проволока равномерна по материалу и толщине, имеет длину a и радиус r, то ее момент инерции, как для цилиндра, по отношению к центру ее тяжести и оси, перпендикулярной к длине, равняется: $p\left(\frac{1}{12}a^2 + \frac{1}{4}r^2\right)$, а по отношению к оси качания сюда надо приложить $+ pl_1^2$, статический же

---

[1] В том, что l бывает более или менее L (расстояние от центра шара до оси качаний) легко убедиться не только простыми соображениями, но и прямым опытом. Если взять легкую горизонтальную металлическую чечевицу и подвесить ее на легком волокне, то для нее, очевидно, разность L и l будет очень мала и ее наибольшее горизонтальное сечение будет проходить почти чрез оси качаний. Заставим такой маятник качаться на короткой нити. Подвесим затем рядом большой шар на возможно тонкой проволоке и, укорачивая проволоку, доведем ее до того, чтобы качания этого большого шара были изохронны с качаниями первого малого маятника. Тогда окажется, что центр малого маятника, или наибольшее сечение его чечевицы, лежит ниже центра большого шара. Если длину проволок сильно увеличить или уменьшить диаметр большого шара—произойдет обратное. Первый опыт, произведенный в Главной палате Ф. П. Завадским с деревянным шаром весом около 4000 г и латунной чечевицей, весившей около 1.7 г (качалась на шелковом волокне), очень поучителен в педагогическом смысле при объяснении понятия о моменте инерции шара, что не легко укладывается в умах начинающих.

[2] Этого совпадения может и не быть, если не будет однородности, но уже Кондамин и Борда применили для устранения этого простой способ: подвешивания за разные (начиная от диаметрально противоположной) точки поверхности. Такой же прием предполагается применить и ко всем шарам маятников при наших опытах. Из этого примера, как и из многих других, ранее и далее упомянутых, видно, что число наблюдений должно выйти очень значительным. Вероятность среднего результата всех исправных определений от этого только выиграет.

момент равен pl_1. Что касается до третьего члена, относящегося к части, соединяющей проволоку с шаром, то, во-первых, вес и размер этой части будут во всяком случае так ничтожны, что ее моментом инерции по отношению к ее центру тяжести можно прямо пренебрегать в сравнении с другими слагаемыми (т. е. принять $=0$) и для момента инерции по отношению к точке подвеса взять просто $p_0 l_0^2$, а во-вторых, если для скрепления брать небольшие винты из того же самого металла, как и шар, а поверхность таких винтов пригнать к поверхности шара, что уже испробовано с надлежащим успехом, то всею этою соединительною частью можно пренебрегать, взвешивая шары вместе с пригнанными к ним винтами. На основании сказанного приведенная длина маятника получится в указанном случае так:

$$l = \frac{\frac{2}{5} PR^2 + PL^2 + p_1\left(\frac{1}{12}a^2 + \frac{1}{4}r^2\right) + pl_1^2 + p_0 l_0^2}{PL + p_1 l_1 + p_0 l_0} \quad \ldots (A_1)$$

Это выражение упрощается, когда вес соединительной части p_0, как сказано выше, введен в вес шара P, затем потому, что тогда длина проволоки, очевидно, $a = L - R$, расстояние l_1 центра тяжести проволоки от точки подвеса равно половине этой длины, т. е. $= {}^1/_2 (L-R)$; член же, содержащий четверть квадрата радиуса проволоки r, по его относительной малости [1] вполне может быть пренебрежен.

Тогда:

$$l = \frac{PL^2 + \frac{2}{5} PR^2 + \frac{1}{3} p (L-R)^2}{PL + \frac{1}{2} p (L-R)} \quad \ldots (B_1)$$

Прежде чем перейти к дальнейшему упрощению выражения (B_1), вспоминая, что центр качания всегда более отстоит от точки подвеса, чем центр тяжести, заметим, что l или расстояние от точки подвеса до центра качания было бы более L (расстояние центра тяжести шара от точки подвеса), если бы шар качался на невесомой нити, но она весома, и это влечет за собою поднятие центра тяжести всего маятника, а потому несомненно только то, что центр качания отстоит от точки подвеса далее,

---

[1] Пусть длина проволоки $a = 20$ м, диаметр же проволоки $= 2$ мм (такой толстой проволоки не надо брать даже для шара в 100 кг), следовательно $r = 1$ мм. Тогда ${}^1/_{12} a^2$ в миллиметрах будет $= 33{}^1/_3$ миллионам, а ${}^1/_4 r^2 = 0.25$, т. е. в 133 миллиона раз менее первого члена, что и позволяет пренебречь вторым членом ${}^1/_4 r^2$.

[2] Для ясности напомним, что чрез l означена длина изохронного математического маятника, чрез L расстояние от точки подвеса до центра шара, чрез $(L-R)$ длина тонкой проволоки, чрез R радиус шара (все они в одинаковых единицах длины), чрез P вес шара и чрез p вес проволоки (конечно в одних и тех же единицах).

чем центр тяжести системы, состоящей из шара и проволоки. Назовем это последнее расстояние K. Оно найдется, очевидно, из равенства:

$$PL + p\,\frac{1}{2}(L - R) = K(P + p),$$

откуда, называя частное из p на P чрез q:

$$K = \frac{L + \frac{1}{2}q(L - R)}{1 + q} \qquad \ldots\ldots (C_1)$$

Так как l всегда, хотя—при малом q—и немного более K, но K всегда, хотя при малом q—и немного менее L, то l и L всегда, при малом q, близки друг к другу, следовательно l проще всего выражать арифметическим отношением к L; избираем такой прием, потому что он обыкновенно прилагается в данном случае. Примем, как сказано выше, $\frac{P}{p} = q$ и кроме того, означая $\frac{R}{L} = s$ (B_1) получаем:

$$l = \frac{L^2 + \frac{2}{5}R^2 + \frac{1}{3}q(L - R)^2}{L + \frac{1}{2}q(L - R)} = \frac{L + \frac{2}{5}sR + \frac{1}{3}qL(1-s)^2}{1 + \frac{1}{2}q(1-s)}.$$

Величины q и s сравнительно малы, напр. при золотом шаре $P = 50$ кг весом и при радиусе R около 0.08 м, вес проволок p не более 0.2 кг, даже при 40 м длины, т. е. q не более 0.004, а s около 0.002, а потому знаменатель столь близок к единице, что можно принять:

$$l = \left| L + \frac{2}{5}sR + \frac{1}{3}qL(1-s)^2 \right| \left| 1 - \frac{1}{2}q(1-s) + \frac{1}{4}q^2(1-s)^2 \right|.$$

Отсюда, по раскрытии скобок, с достаточной степенью точности во всех предстоящих нам определениях можно принять:

$$l = L + \frac{2}{5}sR + \frac{1}{3}qL(1-s)^2 - \frac{1}{2}qL(1-s).$$

Подставляя значения q и s, получаем:[1]

$$l = L + \frac{2}{5}\frac{R^2}{L} - \frac{1}{6}p\frac{L}{P}\left(1 + \frac{R}{L} - \frac{2R^2}{L^2}\right) \qquad \ldots\ldots (D_1)$$

[1] По этой формуле очевидно, что l может быть и более L и меньше, а их равенство настанет при условии:

Для доказательства достаточности вывода по сокращенной формуле (D_1) с тем, что дает полная формула (B_1), возьмем два крайних примера, а именно маятники в 4 и 38 м на проволоках более толстых, чем нужно (потому что чем p больше, тем— при равных прочих условиях—разность обеих формул больше):

Даю по измерению:	$L = 4$ м	38 м
„ „ „	$R = 0.15$ м	0.3 м
„ „ „	$p = 0.01$ кг	0.2 кг
„ „ „	$P = 20$ кг	100 кг
Рассчитываю по (B_1)	$l = 4.000191$ м	37.98818 м
„ „ (D_1)	$l = 4.00191$ м	37.98818 м
Расстояние центра тяжести	$K = 3.989$ м	37.9618 м

В первом из взятых примеров l более L, а во втором менее, расчеты же по (B_1) и по (D_1) в обоих случаях дали одинаковые результаты. В последней строке дано расстояние K центра тяжести всей системы от точки подвеса (разочтено по C_1), чтобы наглядно показать, что l всегда больше K, хотя бывает то больше, то меньше L.

Не считаю затем надобным останавливаться над небольшими изменениями (дополнениями) поправки на длину как в том случае, когда шар подвешивается на двух проволоках (тогда длина проволок немного более $L—R$), так и тогда, когда маятник качается на призме (тогда в основную формулу должно ввести момент инерции и статический момент той части, которая соединяет призму с проволокой), потому что в приведенном простейшем примере выяснен путь, какого предполагаем держаться. Считаем однако необходимым сказать, что, применяя способ разностей (§ 2), непременно должно ввести *все* поправки, какие можно и должно сделать, потому что способ разностей имеет

$$\frac{2}{5}\frac{R^2}{L} = \frac{1}{6}\frac{pL}{P}\left(1 + \frac{R}{L} - \frac{2R^2}{L^2}\right),$$

т. е. когда

$$\frac{p}{P} = \frac{12}{5}\frac{R^2}{L^2} : \left(1 + \frac{R}{L} - \frac{2R^2}{L^2}\right).$$

При данном шаре практически это возможно при малой длине проволоки. Так, если дан золотой шар: $P = 50$ кг и $R = 0.085$ м:

$$p = \frac{0.867}{L^2} : \left(1 + \frac{0.085}{L} - \frac{0.01445}{L^2}\right).$$

При $L =$	0.5 м	1 м	4 м	10 м
При $p =$	3.118 кг	0.809 кг	0.053 кг	0.009 кг

Стальная закаленная проволока длиною около 10 м при весе 9 г (на 1 м около 0.9 г, разорвется уже от груза 25 кг), очевидно, разорвется от груза в 50 кг, а потому практически можно при названном грузе допустить равенство ($l = L$) при длине проволоки не более как около 7 м.

значение лишь для исключения таких поправок, которые могут быть равными или почти равными при том же грузе и т. п. условиях, но при разных длинах.

Так как предлагаемая статья относится не к законченному, а лишь к подготовляемому исследованию, то я считаю излишним делать из нее какие-либо выводы и невозможным рассматривать степень точности, какой можно достичь в определении абсолютного напряжения тяжести при помощи усовершенствований, которые предполагается ввести в это дело. Принимая во внимание все вышеуказанное, мы будем не упускать случаев возвысить точность, но мера успешности таких усилий составляет дело предстоящей впереди работы, труд которой ляжет преимущественно на более меня сильных моих помощников по Главной палате, и я надеюсь, что они доведут это дело до возможного конца. То рвение, с каким многие из них принялись за подготовительные работы, дает в этом ручательство. Мои ослабевшие глаза не позволяют мне лично производить точные отчеты инструментов, а мои с годами слабеющие силы едва позволяют надеяться на достижение конца начинаемого труда, что и заставило меня, быть может более, чем следовало, спешить окончанием этой подготовительной статьи. Ею мне хотелось показать лишь в самых общих чертах цель одного из предпринимаемых Главною палатою исследований и средства для того, доныне намеченные. Повторю под конец, что всякие полезные указания и способы содействия будут приняты нами с благодарностью, потому что затеваемое дело касается одного из настоятельных научных вопросов.

21 мая 1905 г.

Подписано к печати 30/VII 1946 г. Печ. л. $40^1/_2 + 18$ вклеек. Уч.-изд. л. 51.
М 058082. Тираж 3 000. Заказ № 1671.

Тип. № 3 Управления издательств и полиграфии Исполкома Ленгорсовета

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
15	2 св.	1885	1875
88	1 сн.	l —	$l =$
89	18 св.	вычисленная высота	вычисленная высота—высота
131	23 сн.	вместе	высоте
187	17 св.	XXIII	XXVIII
195	18 „	— действительности	= действительности
260	7 „ 6 столб.	54	24
265	16 сн.	= 5°0	= — 5°0
313	22 сн.	единицы	единицы жидкости
318	21 сн.	из сопротивления	из сопоставления
325	23 св.	XXVII	XXXVII
339	9 „	$(n = 1)\ P$	$(n - 1)\ P$
341	13 сн.	= 99.5	= 999.5
372	10	$(0.169)^2 + (0.169 + 1/2 \sin 8°13'24'')$	$\sqrt{(0.169)^2 + (0.169 + 1/2 \sin 8°13'24'')^2}$
374	12 св.	соприкосновение	сопротивление
379	12 „	7.94	5.94
384	10 „	$(l = 1)$	$(b = l)$
388	8 сн.	геометрическое	симметрическое
394	6 „	v	$\sqrt{v}$
410	19 „	$+ \frac{1}{r} + 0.00223\Big),$	$+ \frac{1}{r} 0.00323\Big),$
432	22 „	= 99.7	= 999.7
443	14 св.	$= L\,0.2354.$	$= L\,0.0254.$
619	13 „	500 кг	50 кг
636	10—11 св.	меры погрешностей вычислений (как	меры будут приняты для возможного уменьшения этого рода погрешностей (как
639	19 св.	$= T$	$= -T$
646	14 „	$s(B_1)$	из $s\ (B_1)$

Лист 1-й

Черт. 1. Служит для объяснения отношения между сопротивлением *mn* на перпендикулярную плоскость *M*, нормальным сопр. *on* к наклонной плоскости *S* и прямым (вдоль пути) сопротивлением *rn* на эту же наклонную плоскость *S*.

Стр. 308, 309, формулы (II), (III) и (IV).

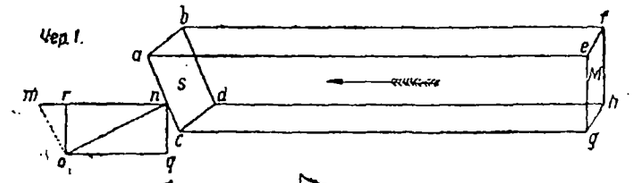
Черт. 2. } Черт. 3. } Черт. 4. } Приборы Дю-Бюа (1782 г.), подобные трубке Пито, для определения давления впереди и сзади двигающегося тела (стр. 332, гл. I).

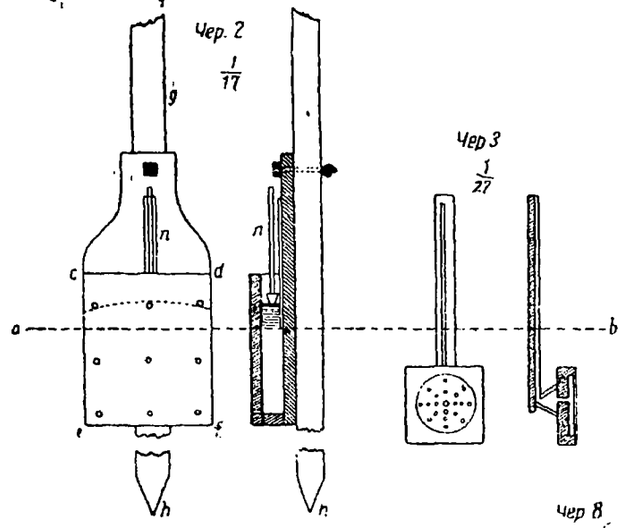
Черт. 5. Прибор Кулона (IX г. республики = 1801 г.) для определения величины трения. Род крутильных весов, *ag* проволока, *f* круг с делениями, *C* то же. По нему и указателю *m* определяются амплитуды качания диска *AA*, погружаемого в воду или масло (гл. I, стр. 323).

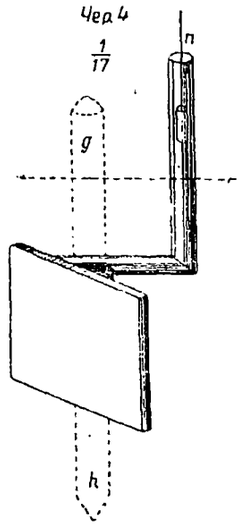
Черт. 6. } Черт. 7. } Прибор Боссю и Кондорсе (1778 г.) для определения сопротивления угловатых плавающих тел. Наверху ко́зел *TT* вал с двумя шкивами. Шкив *V* служит для прикрепления тянущего груза *P*, а шкивом *X* тянется веревкою *C*, проходящею чрез блок *A*, модель *S*. Для того, чтобы она притом шла прямо, служит веревка *EF*, проходящая между блоками, прикрепленными к модели в *x* и *x*. Подробнее эти блоки видны на черт. 11 (описание, гл. II, также стр. 317).

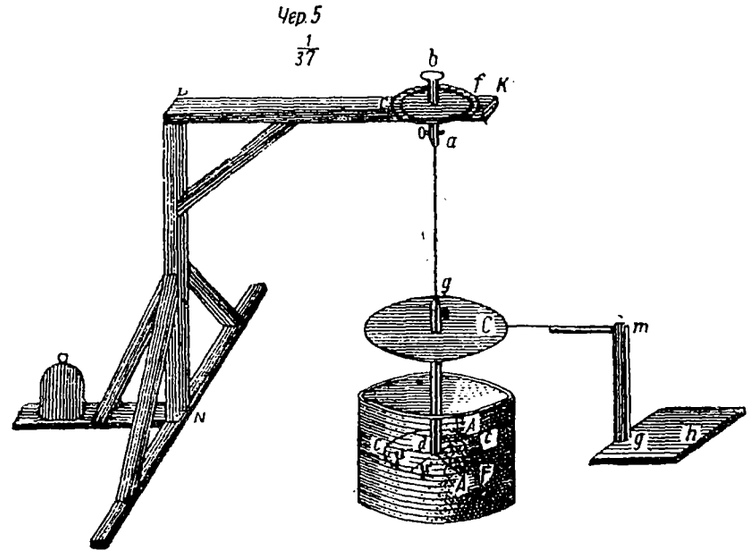
Черт. 8. } Черт. 9. } Черт. 10. } Некоторые из моделей, служивших в опытах Боссю и Кондорсе. *MNOP* — часть выдающаяся из воды, *R* — руководящая веревка, *r* — та веревка, за которую модель тянется грузом.

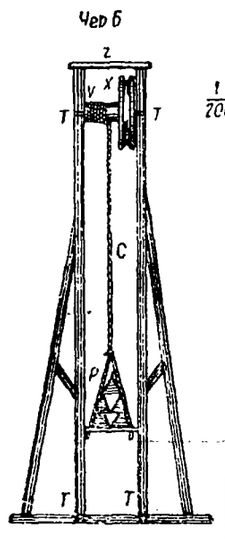
Рисунки сняты с подлинников г-м Павловым. Дроби около чертежей здесь и на всех других чертежах означают масштаб или отношение линейных размеров чертежей к действительным.

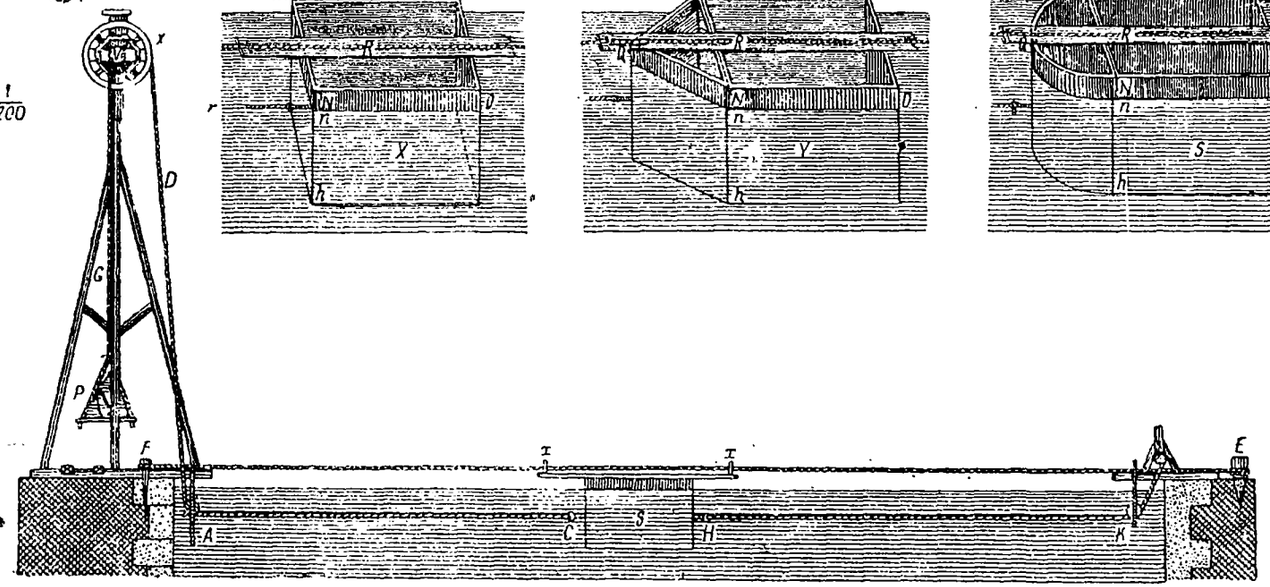


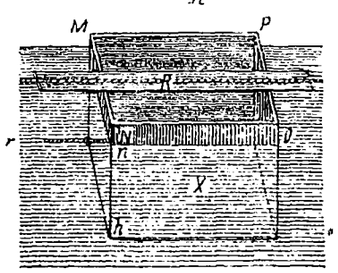


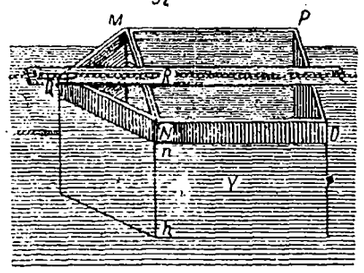


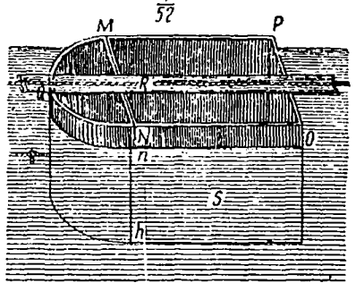


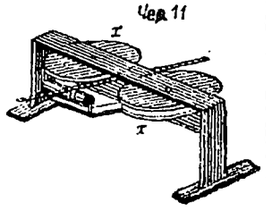












Картогр. Зав. А. Ильина. Еол. Мастерск. д. № 11/43.

Лист 2-ii

Опыты французских академиков (д'Аламбера, Кондорсе и Боссю) над сопротивлением воды; произведены в июне, августе и сентябре 1775 г. в Париже, на пруде военной школы (Ecole Militaire). Рисунки взяты из книги: „Nouvelles expériences sur la résistance des fluides", par MM. d'Alambert, le Marquis de Condorcet et l'Abbé Bossut, Membres de l'Académie Royale des Sciences etc. (Paris, 1777).

Черт. 12 — перспективный. Общее расположение прибора для опытов в безграничной массе воды. Бассейн выложен камнем. Длина *AB* 100 футов ширина посредине 53 фута, глубина около *AB* 6½ фут. *MN* мачта 76 ф. высоты. *E* деревянные козлы для медного блока *S*, могущего быть поднятым в особых вырезках. Наверху мачты железный кронштейн *LR*, на конце которого блок, такой же, как внизу. Этот блок закрывается крышкою. Модель *Z* тянется по направлению *HS* грузом *P*, висящим на шелковом шнуре, проходящем оба блока. Веревка продолжается ниже груза, чтобы уравновесить другую ее часть. Вес веревки 28 унций на 39 туазов длины. Части *H* и *S* веревки на одном уровне. Начиная от бока *AK*, края пруда *AB* и *CD* разделены чрез 5 фут., чтобы наблюдать прохождение модели и скорости. Вся длина пробега 66 ф. Наблюдалась скорость на 50 последних футах.

Черт. 13. Одна из моделей (*n*°4), которой сопротивление определялось. Горизонтальный разрез. Движение производилось стороною *AB* вперед. Глубина призмы 19 дюймов 8 линий. Длина *BC* 2 фута 1 дюйм 9 линий. Часть *EFC* вне воды, служит для прикрепления руля *FH*, без которого модели получают волнообразное движение.

Черт. 14 и 15. Модель судна (*n*°6) в поперечном вертикальном разрезе и перспективе. Длина *CD* = 6 фут. Наибольшая ширина *cf* = 19″8‴, глубина *OM* = 19½″.

Черт. 16. Модель (*n*°8) с угловатым носом, горизонтальный разрез. Призма. Глубина 18″. *BE* = 4′, *FG* = 2′, *AB* = 2′, *QD* = 6″. Сзади руль (длина 4′4″) не изображен.

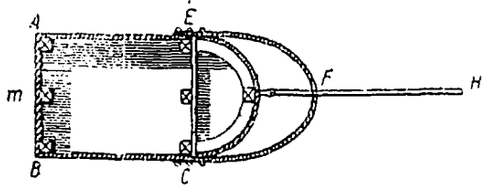
Черт. 17. Модель (*n*°1) призма с носом плоским *AB* и остроконечною кормою, с рулем *DH*. Размеры на рисунке.

Черт. 18. План части пруда, изображенного на черт. 12 с мачтою *M*. Показывает расположение опытов для определения сопротивления разных моделей в каналах, для чего в пруде и сделан искусственный канал.

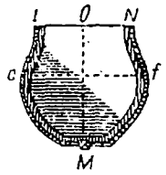
Описание в II главе.

С подлинников копировал этот лист г. Васильев.

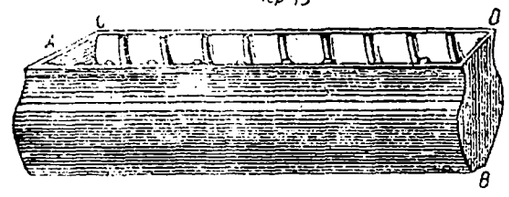
Чер. 13.



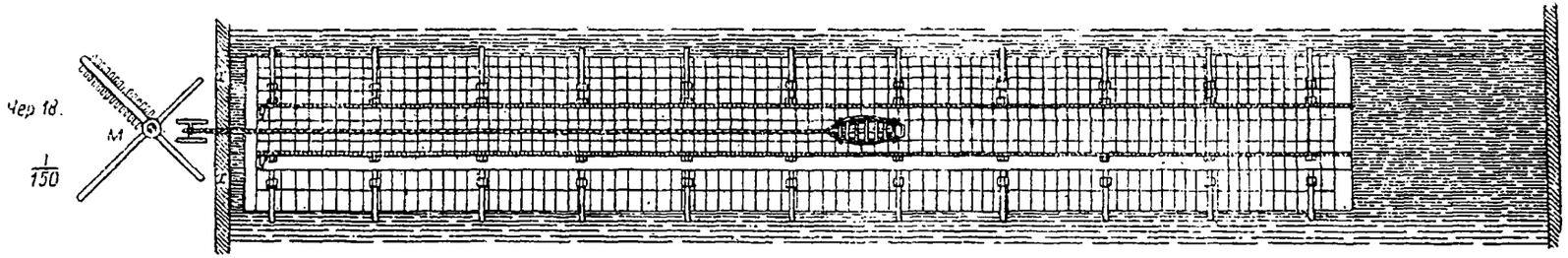
Чер. 14



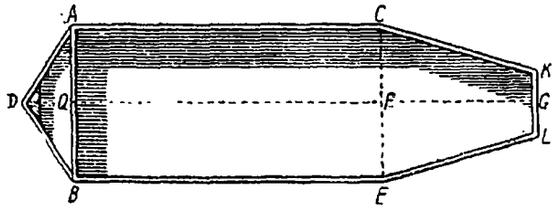
Чер 15



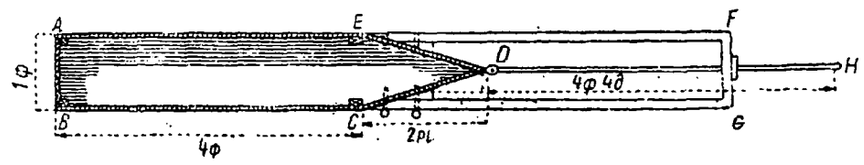
Чер 18.



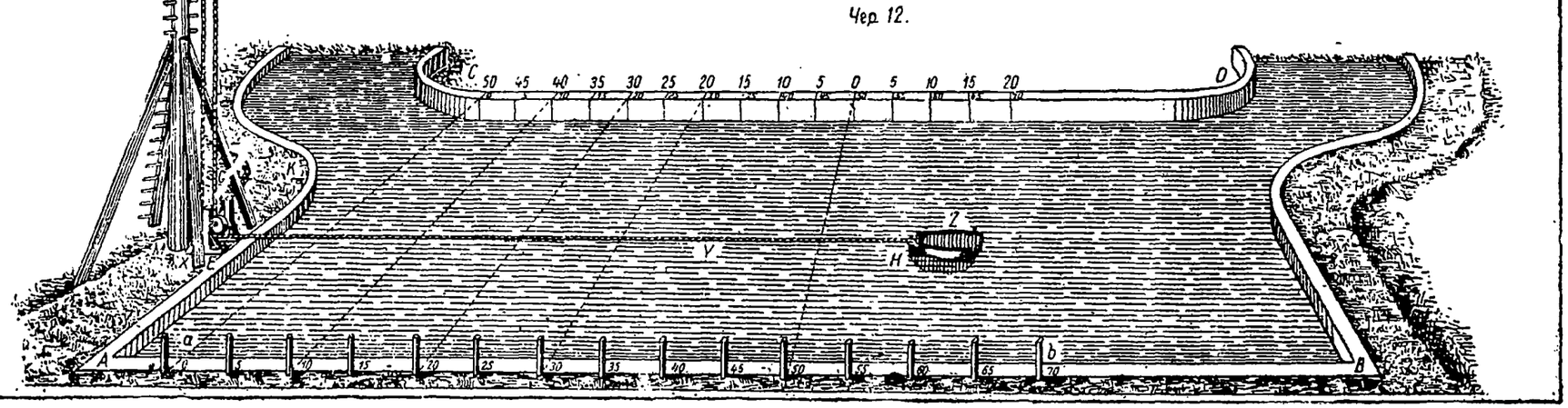
Чер. 16



Чер 17



Чер. 12.



Картогр. Зав. А. Ильина. Б. Маст. № 11/43.

Лист 3-й

Черт. 19. Вращательный прибор, двигающийся гирей *P*, примененный Борда (1763 г.) для определения сопротивления воздуха, при движении плоскостей или тел разной формы, напр. тех, которые представлены на черт. 20, 21, 22 и 23 (гл. II).

Черт. 24. Вращательный прибор Борда (1767 г.) для определения сопротивления воды при движении в ней шара или других тел, напр. тела, разрез которого изображен на черт. 25 (гл. II).

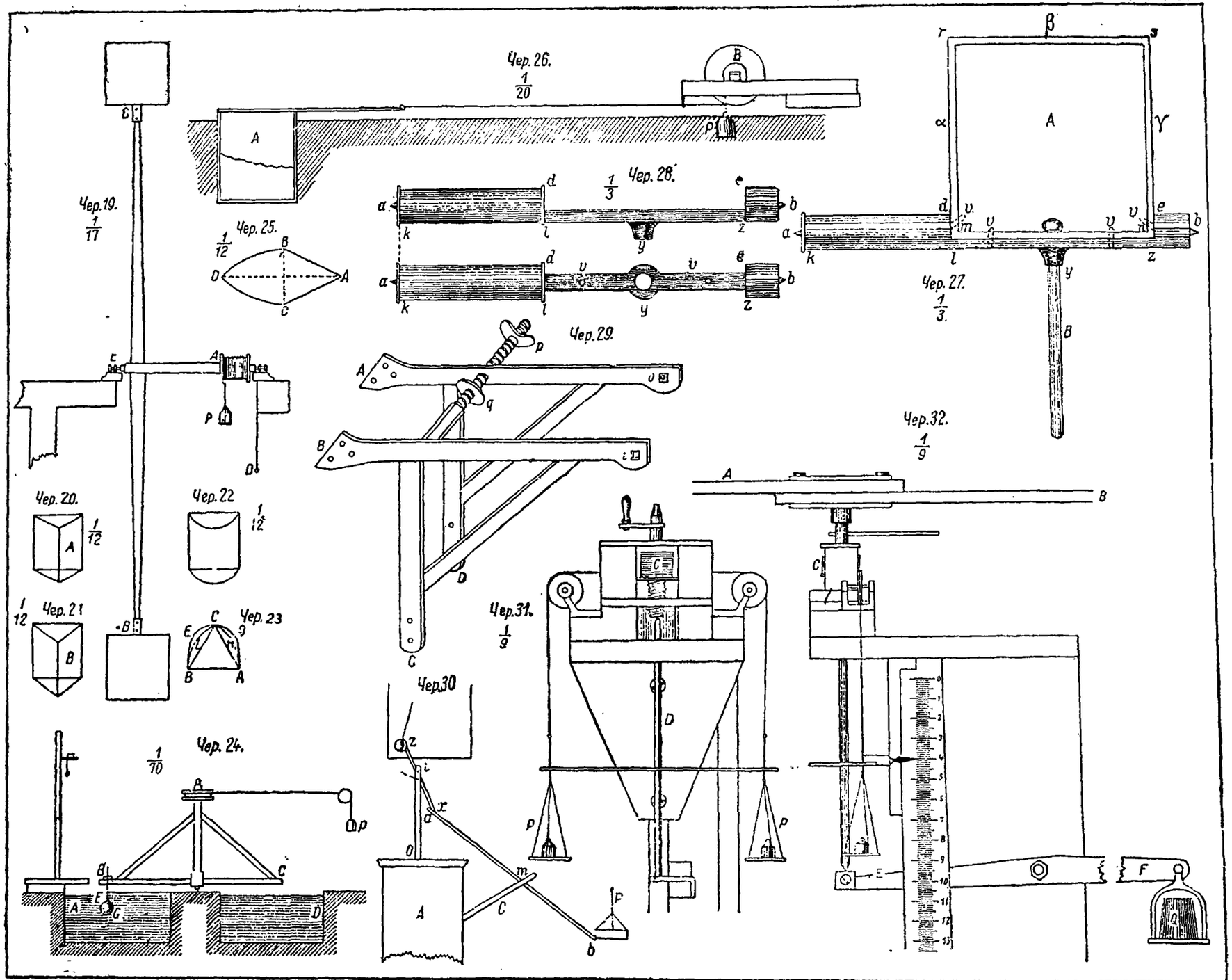
Черт. 26. Опыт Борда (1763 г.) для определения сопротивления куба *A*, прямолинейно движущегося в воде при действии груза *P* (гл. II).

Черт. 27. Вращательный прибор Прехтля (1806 г.) для определения воздушного сопротивления пластинки *A*, помещенной в рамке *rsmn*, укрепленной на оси *ab*, изображенной отдельно на черт. 28. Стержень *B* служил для противовеса, а на оси *dk* наматывалась нить с движущим грузом. Ось *ab* вкладывалась при опыте в отверстия *io* поддержки, представленной на черт. 29 (гл. II).

Черт. 30. Приспособление Прехтля (1806 г.) для определения времени прохождения движущего груза *P* чрез известные точки. При этом маятник *z* опускается отходящими рычагами *ba*, *xz*. Груз *P* на нити, намотанной на оси *kd* прибора черт. 27 (гл. II).

Черт. 31 и 32. Вращательный прибор Хагена (1874) для воздушного сопротивления пластинок, прикреплявшихся на длинных плечах *A* и *B*, отчасти видных в продольном разрезе (черт. 32). На вертикальной оси шкив *C*, а на нем две нити, тянущие прибор грузами *PP*. Под шкивом винт, поддерживаемый осью *D*, опирающейся на плечо коромысла *EF*, уравновешивающего грузом *Q* вес прибора (гл. II).

С подлинников копировал г. Севастьянов.



Картогр. Зав. А. Ильина, Б. Маст. д. № 11/43.

Лист 4-й

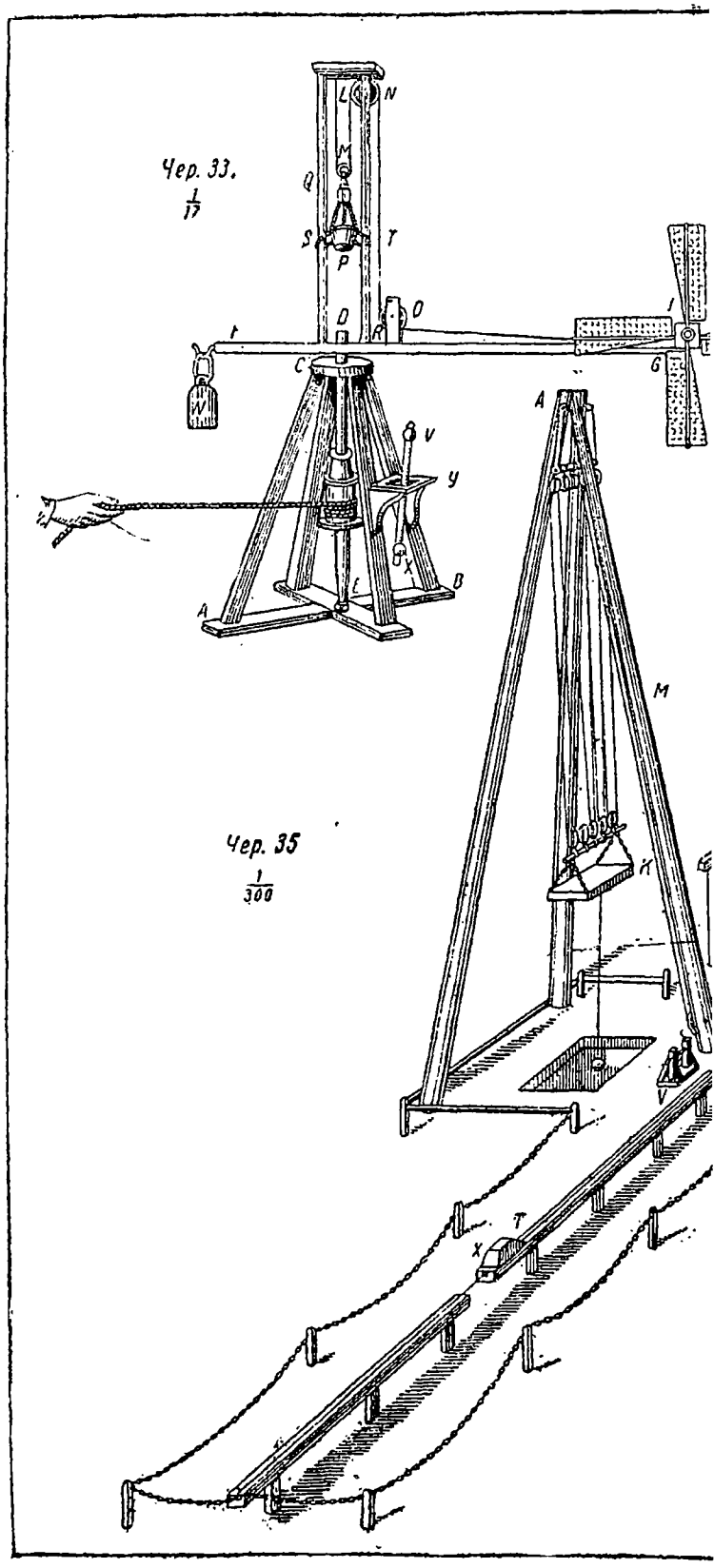
Черт. 33. Прибор Смитона (Smeaton, 1759 г.) для определения реакционного сопротивления, действующего в ветряных мельницах. Ось *ED* вращается натягиванием шнура, намотанного на шкив. Скорость определяется маятником или метрономом *XV*. Плечо *FG*, уравновешиваемое грузом *W*, имеет перпендикулярную ось *J*, на которой вращается мельница *G*, тянущая при этом чрез блоки *R* и *L* груз *P*, руководимый подпорами *S* и *T* (гл. II).

Черт. 34. Вращательный прибор Ваинса (Vince, 1795) для определения сопротивления движущихся пластинок *e*, *f*, *g*, *h*, в их прямом и наклонном положении. Маховики *ac* и *bd* прикреплены на оси *mn*, вращающейся в станке *EGF* вследствие действия грузов *R* и *T*, действующих нитями *u* и *u'*, чрез блоки *x* и *z*. Изображенное положение соответствует определениям сопротивления воздуха. Для воды — прибор обращался вверх опорами и погружался в воду до уровня блоков *zx* (гл. II).

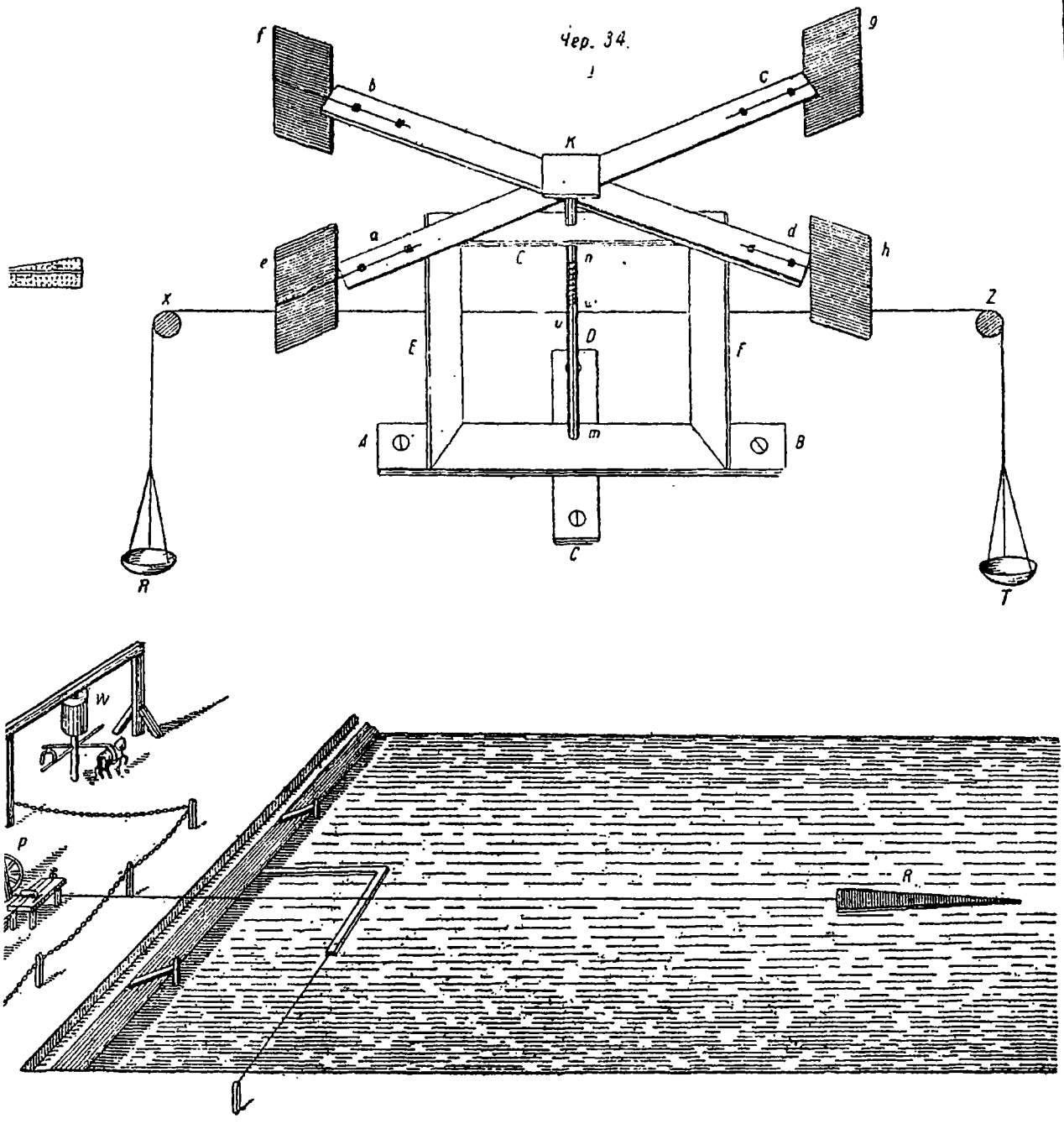
Черт 35. Общее расположение приборов Бофуа (Beaufoy) в 1793—1795 гг. для определения, по весу груза *K* (поднимаемого вверх воротом *W*), сопротивления плавающих тел *R*. Наблюдения производились в гренландском доке Лондона. Верхняя часть козел *MA* изображена на следующем листе, черт 37, а на черт. 38 видны подробности прибора *TX*, служившего для определения скоростей и соединенного с блоком *P*, чрез который проходит тянущая веревка (гл. II).

Описание в II главе.

Рисунки копировал г. Васильев.



Чер. 34.



Картогр. Зав. А. Ильина, Б. Маст. д. № 11/43.

Лист 5-й

Приборы, служившие (как и черт. 35) Бофуа для определения сопротивления воды в гренландском доке Лондона в 1793—1798 гг. Рисунки сняты с полного сочинения: „Nautical and Hydraulic Experiments", изданного в 1834 г. Оттуда же взяты рис. 35 и сняты таблицы 6, 7 и 8 (гл. II).

Черт. 36. Поплавок или кондуктор 1796 г. (лист 6), к которому на двух круглых стержнях прикреплялись погруженные в воду тела *C*. Крышка *A* закрывает ящик *B* для балласта.

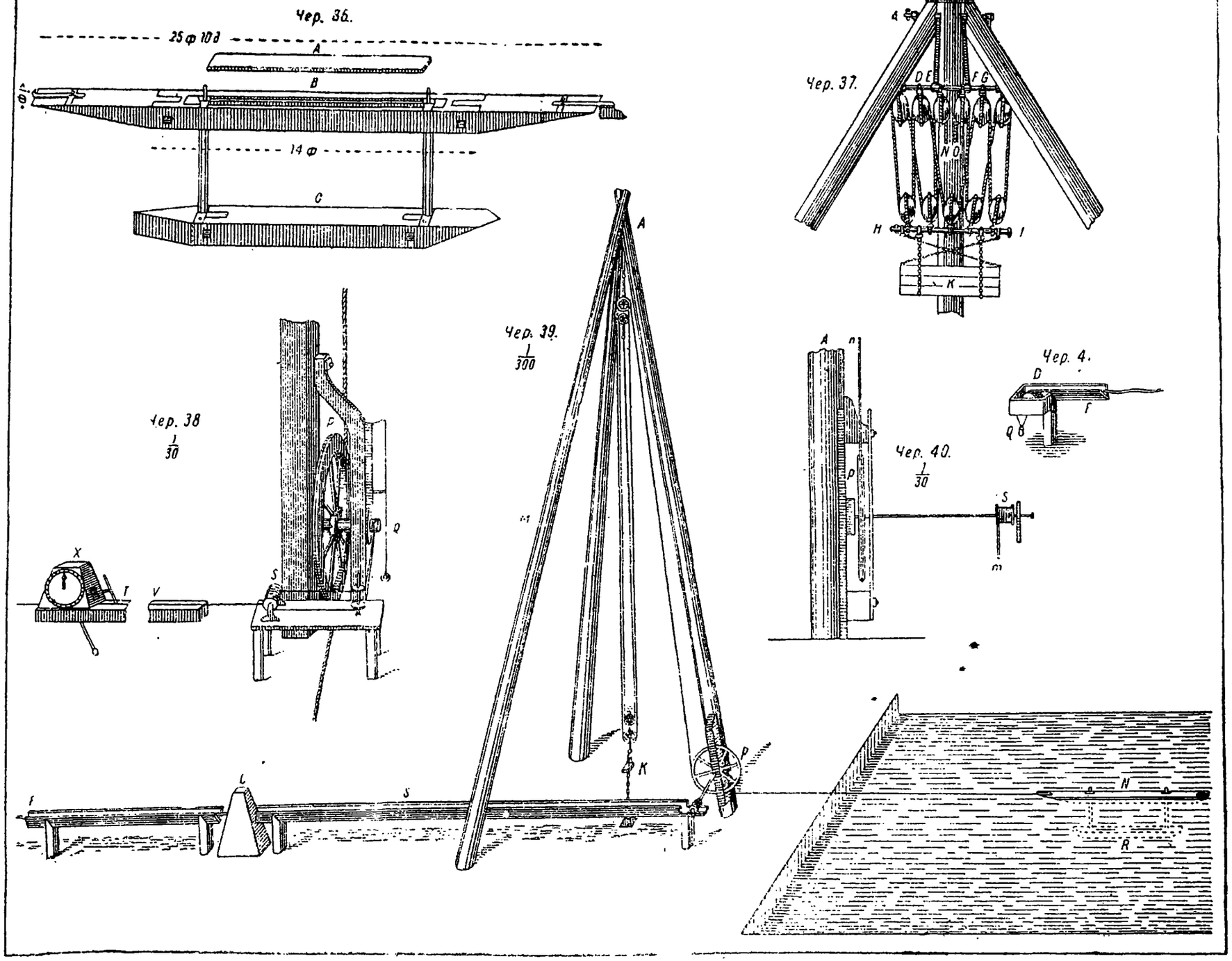
Черт. 37. Верхняя часть козел *MA*, изображенных на черт. 35, лист 4-й. Способ, которым действует груз *K* на ходовой конец *O* веревки, проходящей чрез 5 подвижных блоков.

Черт. 38. Расположение блока *P* (в приборе черт. 35), чрез который идет тянущая веревка. На оси блока шкив *Q*, наматывающий нить, тянущую шкалу *TV*, на которой часовой механизм *X* отмечает секунды, что и служит для определения скорости.

Черт. 39. Общее расположение приборов Бофуа в 1796—1798 гг. для определения сопротивления погруженных тел *R*, прикрепленных к ведущему поплавку *N*. Устройство мало отличается от черт. 35.

Черт. 40. Устройство 1796—1798 гг. для передачи движения от тянущей веревки *n*, проходящей чрез блок *P*, к шнуру *m*, наматывающемуся на шкив *S* и служащему для передвижения шкалы, лежащей во влагалище *FS* (черт. 39), кончающемся близ *F* шкивом *D*, изображенным на черт. 41, на который действует груз *Q*, служащий для равномерного натяжения шнура, тянущего шкалу.

Описание в II главе.
Копировал г. Васильев.



Картогр. Зав. А. Ильина. Б. Маст. д. № 11/43.

Лист 6-й

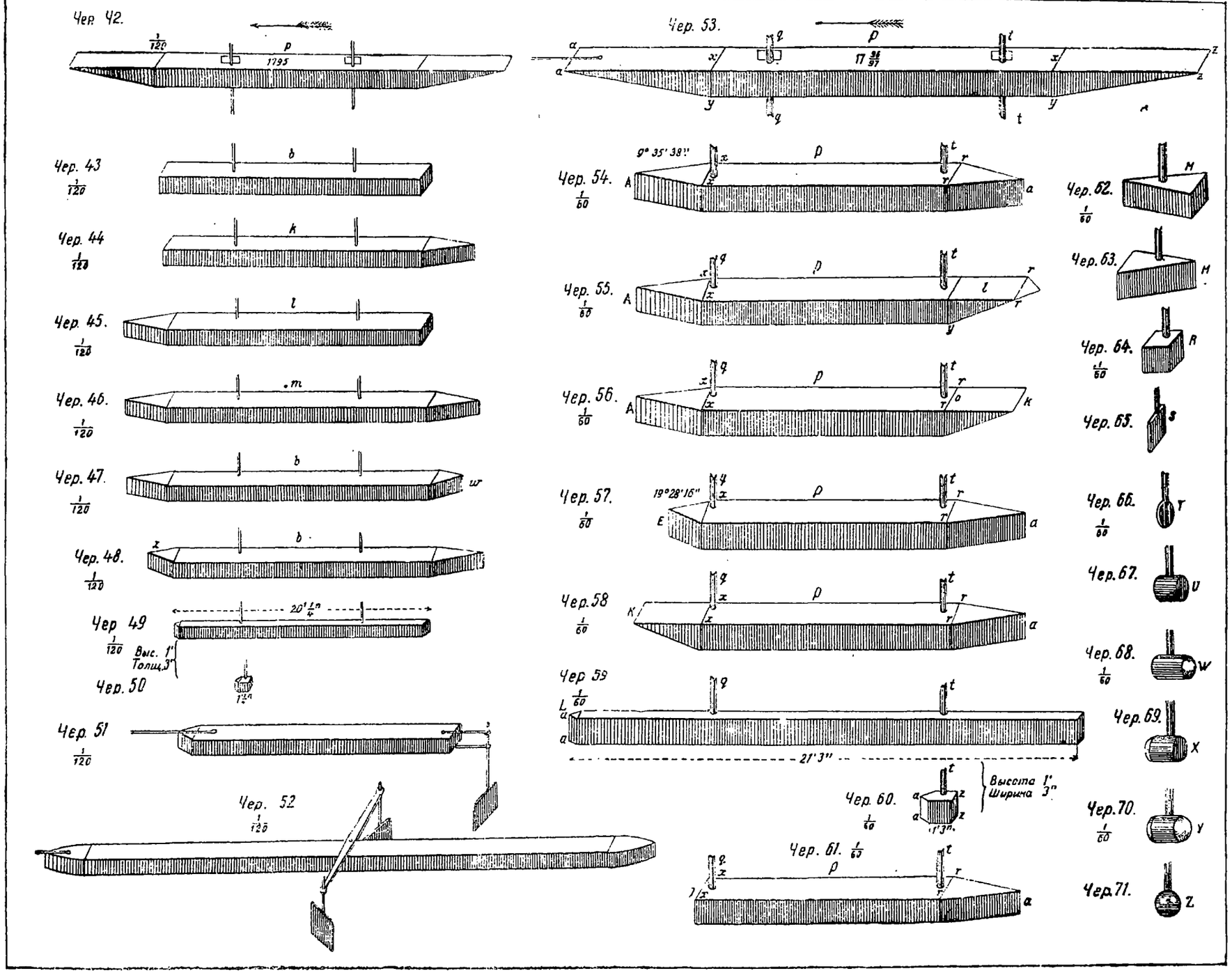
Изображение некоторых тел, погруженных в воду, сопротивление которых определял Бофуа в конце 1795 г. (черт. 42—52), в конце 1796 г. (черт. 53—61) и в 1797 г. (черт. 62—71) при помощи приборов черт. 35 и 39, применяя кондукторы или поплавки *p* черт. 42 и *P* черт. 53 (у него размеры: $az = 25'10''$, $yy = 14'$, $aa = 1'$, $yx = 1'$). В 1797 г. служил точно такой же кондуктор, как *P*, только стержень *t* был один и круглый, а в 1796 г. было два угловатых. Буквы, стоящие около чертежей, составляют те наименования, которыми тела отмечены в сочинении Бофуа. Так, напр., в 1795, 1796 гг. опыты были сделаны с телами *b*, *k*, *l*, *m*, *bw*, *xb* черт. 43—48. В этом году сделано было определение трения с длинною доскою (заостренный конец), черт. 49, и с короткою, черт. 50. Такие же опыты были в 1796 г. черт. 59 и 60 (а также в 1798 г. черт. 74 и 75 — здесь передний конец тупой). Черт. 51. Способ определения сопротивления нормальных и черт. 52 наклонных пластинок при разных глубинах и уклонах.

В 1796 г. определения сделаны с телами *APa*, *APl*, *APk*, *EPa*, *KPa*, *JPa* (черт. 54, 55, 56, 57, 58, 61) и т. п.

В 1797 г. определено сопротивление трехгранной призмы *M* (черт. 62, 63), куба *R* (черт. 64) и т. п. тел (черт. 65—71).

Подробности во II главе.

Копировал рисунки с подлинника г. Васильев.



Картогр. Зав. А. Ильина. Б. Маст. д. № 11/43.

Лист 7-й

Погруженные в воду тела, сопротивление которых определял Бофуа в 1798 г. при помощи прибора черт. 39 (лист 5-й) и кондуктора или поплавка, представленного на черт. 72 и 73 в разрезе ($az = 25'10''$, $xx = 3'4''$, $yy = 14'$, $cc = 1'$, $ay = 6'$, $c = 1'$, $xc = 3''$, $a = zz = 1'$, $ii = 8''$, толщина бруса $n = 2''$, разрез его эллиптический). Так как Бофуа сам считает определения этого года лучшими из своих, то здесь изображены все тела, исследованные в этом году. Общий масштаб (как и в книге Бофуа) 1/60 действительных размеров.

Черт. 74 и 75. Доски (передний конец тупой), служившие для определения трения. Вышина 1′8″, толщина 3″, длина черт. 74 = 14′, черт 75 = 2′.

На черт. от 76 до 85 переднюю или носовую часть составляет тело названное буквою *A*. Это трехгранная призма, высота = 1′, основание треугольник, у которого 2 передние стороны = 3′, а задняя = 1′; потому угол встречи 9°35′38″. Эта же призма, составляя корму, означается *a*, напр. черт. 77, 86—92. У призмы, означенной *O* или *o*, на черт. 76 и 9.., угол падения = 6°22′45″. У призмы, означенной *B* или *b*, на черт. 78 и 86, бока основания суть дуги круга в 8′ радиуса, а линейные размеры, как у тела *A*. У призмы *C* или *c*, черт. 79 и 87, главные размеры как у *A*, но основание эллипс. У призмы *D* или *d*, черт. 80 и 88, угол падения 14°28′39″, у *E* или *e*, черт. 81 и 89, 19°28′16″. У призмы *F* или *f* черт. 82 и 90,30° (все стороны основания = 1′), у призмы *G* и *g*, черт. 83 и 91, основание образовано дугами круга, которого радиус = 1′, призма *H* и *h* (черт. 84, 92, 93, 96, 97 и 98) есть полуцилиндр радиус 6″. Буквою *I* (черт. 94, 95 и 97) или *i* (черт. 96, 85) означается квадратная площадка в 1′. Буквою *L* (черт. 99, 101) или *l* (черт. 99 и 100) означается круглая площадка диам. 13″.54, представляющ я поверхность 1 кв. фута. Чрез *Q* или *q* (черт. 100, 101 и 102) означается полушар, площадь большого круга которого = 1 кв. футу.

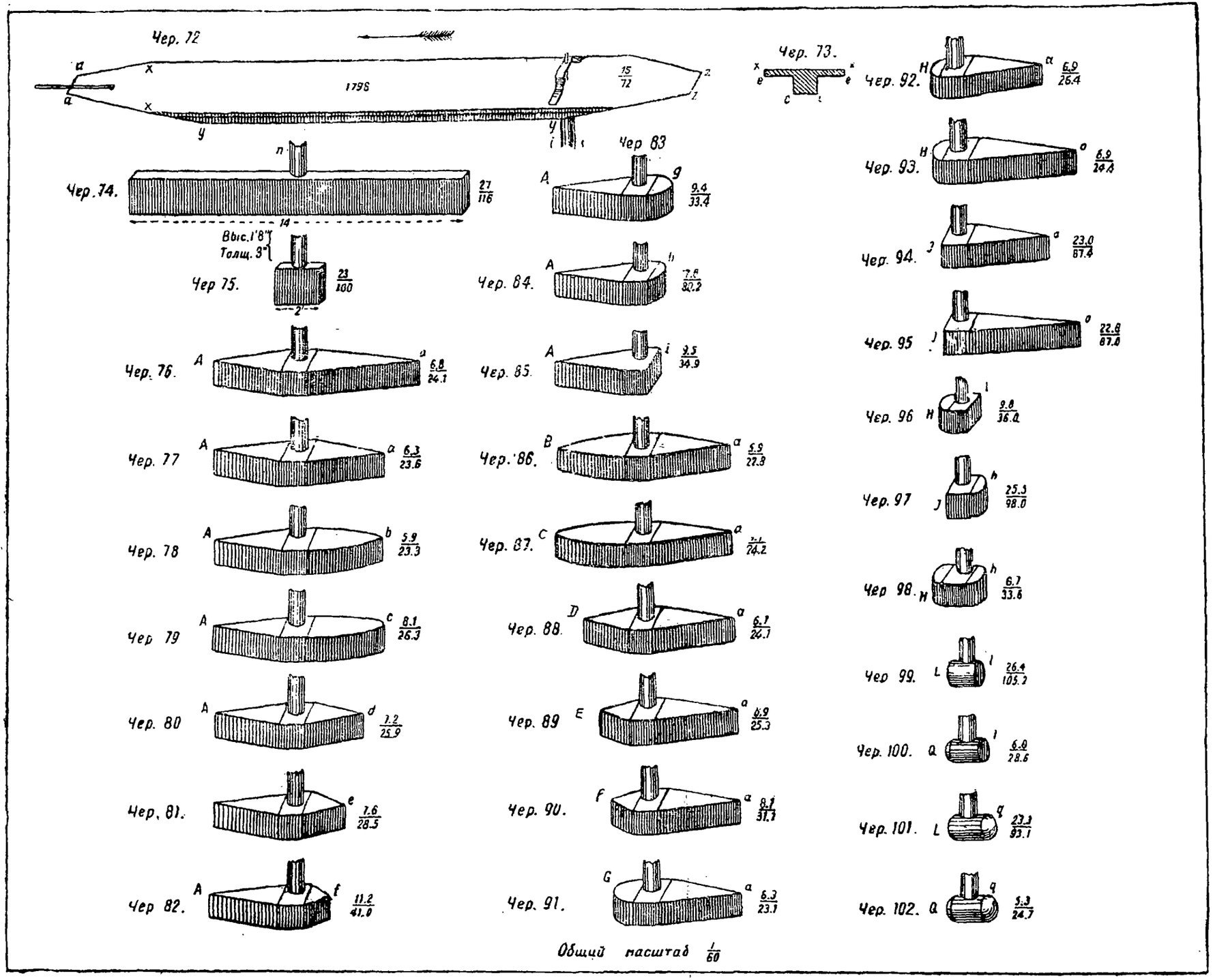
У всех тел от черт. 76 до 98 в середине куб, которого стороны = 1′.

У всех тел от 76 до 102 поперечное сечение = 1 кв. футу (английскому).

Дробь, стоящая около кормы тел, означает их сопротивление в английских футах, в числителе при скорости 5 футов, в знаменателе при $v = 10'$.

Подробности во II главе и на стр. 345.

С подлинника копировал г. Васильев.



Картогр. Зав. А. Ильина. Б. Маст. д. № 11/43.

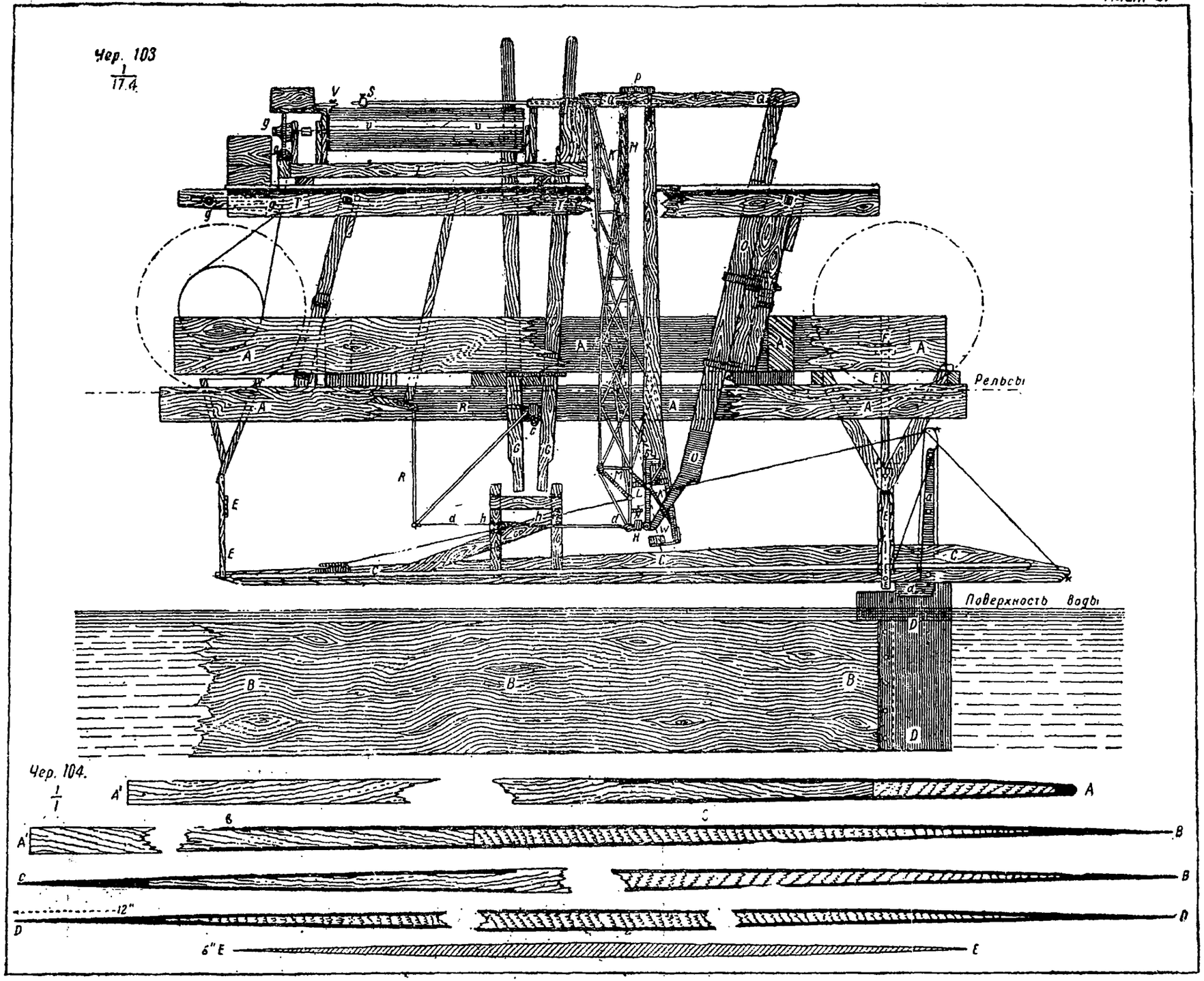
Лист 8-й

Черт. 103. Прибор Фроуда (1872 г.) для определения сопротивления моделей кораблей (см. 8-е приложение) и трения воды (см. гл. I). Вертикальный разрез и вид (фасад).

AA — ложе для рамки.
BB — доска, поверхностное трение которой определяется.
CC — горизонтальны брусок, соединенный с доскою и передающий ее сопроти ление пружине посредством соединительного шнурка *hh*.
DD — водорез или кат-ватер (нос), прикрепленный к бруску *CC* посредством выступа *aa*.
EE — подвижная рамка, поддерживающая брусок *CC*.
F — противовес для бруска *CC* и пр.
GG — рычажное приспособление (и и спуск), посредством которого можно сделать пружину неподвижною (отделяя ее) или заставить ее действовать.
H — пружина, растяжение которой служит мерой сопротивления.
K — рычаг для передачи растяжения пружины на цилиндр.
W — противовес для рычага.
L — подпорка для рычага (*K*); она прикреплена к бруску *bb*.
MM — рычаг, передающий растяжение пружины рычагу *K*.
N — связь для передачи растяжения пружины рычагу *K*.
OO — неподвижная часть, прикрепленная к переднему концу пружины.
P — головк , посредством которой привешены *bb* и *MM*.
QQ — поперечина, соединяющая конец бруса *O* и головку *P* с рамкой, поддерживающей цилиндр *UU*.
RR — ручка для вытяжения пружины посредством гири (*c*), привешенной к *c*.
dd — соединение между ручкой (*RR*) и пружиной.
c — руз, обусловливающий первоначальное растяжение пружины, отвечающее нулю скалы.
S — перо, регистрирующее или записывающее на движущемся цилиндре *U* растяжение пружины *H*.
UU — вращающийся цилиндр для бумаги, на которой отмечается движение пера и пр.
TT — рамка, поддерживающая этот цилиндр; она может быть поставлена вертикально.
V — перо, приводимое в действие посредством часового механизма.
gg — ремень для передачи движения прибора цилиндру *UU*.

Черт. 104. Натуральные размеры (full size) горизонтальных разрезов тех досок, трение которых определялось прибором черт. 103. Толстые линии означают металлический нос (и корму), к которому прилаживалась вглядь деревянная доска, как видно под знаками *AA'*, *BA'*, *BC'*. Под буквами *D* и *E* означены доски с заостренными концами. *D* была длиною вся 12 дюймов, а *E*, как изображена, длиною 6 дюйм.

Описание — гл. I, стр. 358 и приложение 6-е.
Копировал с подлинника г. Севастьянов.



Картогр. Зав. А. Ильина. Б. Маст. д. № 11/43.

Лист 9-й

Диаграммы, выражающие в англ. фунтах сопротивление досок (лист 8-й) или трение воды в опытах Фроуда (1872 и 1874 гг.).

Масштаб этих диаграмм в два раза менее, чем в мемуаре Фроуда. (Brit. Assoc., 1872 и 1874).

Черт. 105. (IV Froude). Наблюдения над досками при разных длинах и качествах поверхности. *AA* длина 50′, окружность поперечного сечения 3′2″, нос и корма острые, покрыты лаком, *A′A′* та же доска покрыта составом Гэ (Hay's composit.) *A″A″* та же доска, корма тупая, лак. *BB*, длина 28′, та же окружность, нос тупой, корма острая, лак. *CC* длина 16′, окружность та же, нос и корма острые, лак. *C′C′* та же, но состав Гэ. *C″C″* та же, покрыта оловянными листами. *DD* длина 5′, окружность та же, нос и корма острые, лак. *D′D′* та же, состав Гэ. *EE* результаты сопротивления воздуха прибору.

Черт. 106. (V). Продолжение предшествующей (масштаб взят другой). *AA* длина доски 2′6″, окружность 3′2″, нос и корма острые, лак. *A′A′* та же доска, корма тупая. *A″A″* та же доска, корма утончена и прямо срезана. *A‴A‴* корма той же толщины и срезана прямо; *BB* длина 1′6″, нос и корма острые, лак. *B′B′* та же доска, покрыта оловянными листами. *CC* длина 1′, окружность та же, нос и корма острые, лак. *C′C′* она же покрыта оловом. *DD* сопротивление воздуха на рамку и др. подвижные части.

Черт. 107. (VI). Полное (total) среднее сопротивление поверхности (поверхность покрыта лаком, состав Гэ, Пиккока или салом) разной длины, приведенное к 1 футу ширины. Напр. для скорости 500′ и длины 50′ черт. 105 дает сопротивление около 28 фунт., но там вся поверхность определяется окружностью 3′2″, следовательно при ширине = 1′ сопротивление = 8.9 фунта, что и дано на чертеже.

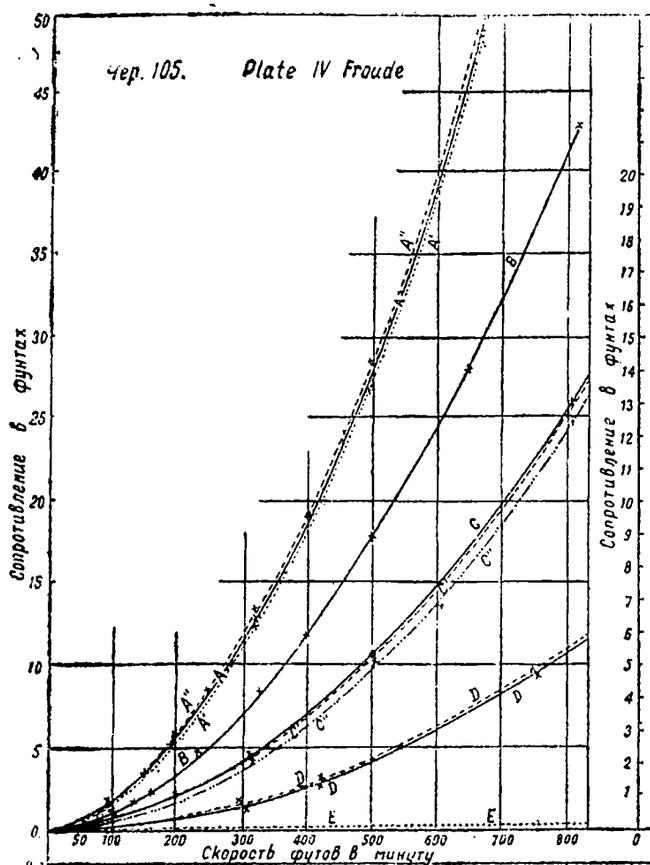
Черт. 108. (VII). Сопротивление поверхности разной длины при разных скоростях. *aa* данные для доски с тупым (черт. 104, *A*) носом и срезанною кормою. *a′a′* — нос острый, *a″a″* нос и корма острые. Здесь сопротивление воздуху и сопротивление водореза вычтены из полного наблюдаемого сопротивления.

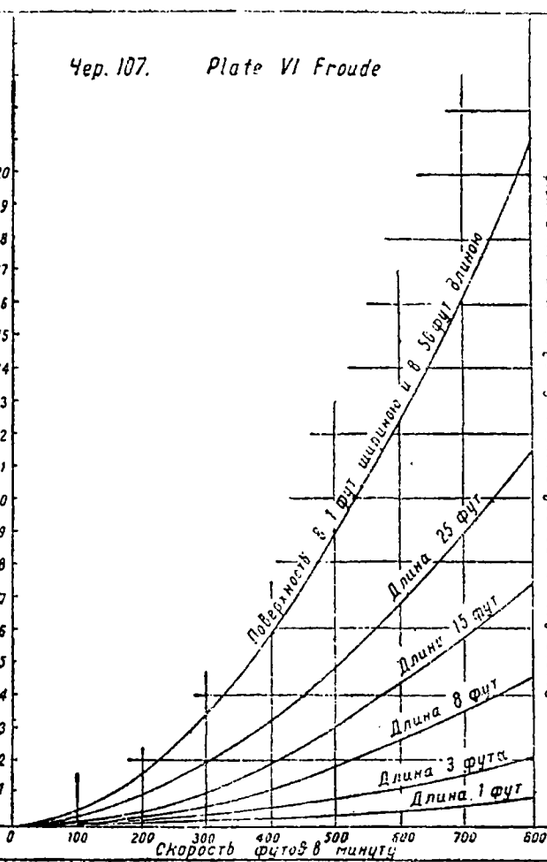
Черт. 109. Полное сопротивление при разных качествах поверхности для досок разной длины, при окружности досок = = 1 футу. Сплошная линия для лакированной поверхности. Линия прерванная — для парафина, коленкора и олова. Линии с точками — для песка различной мелкости.

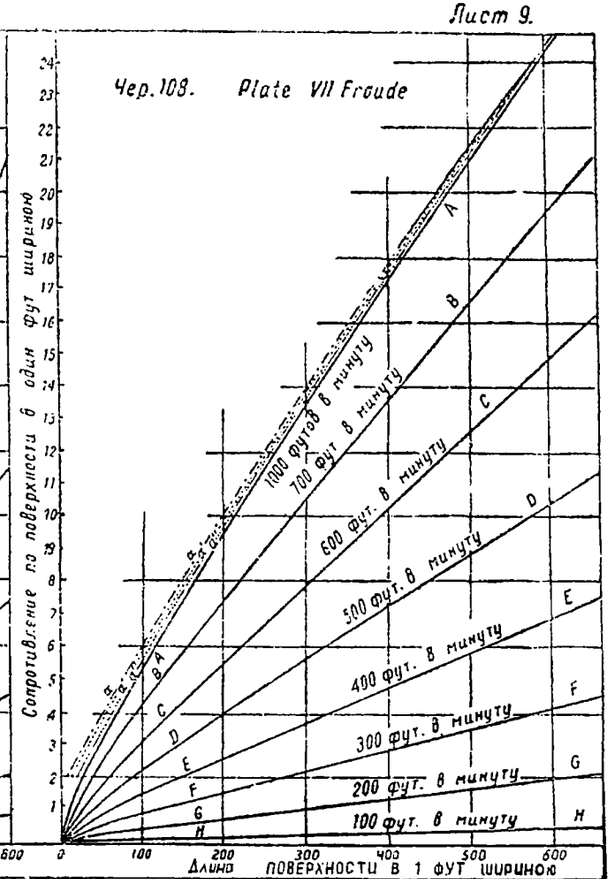
Черт. 110. Продолжение предшествующей таблицы.

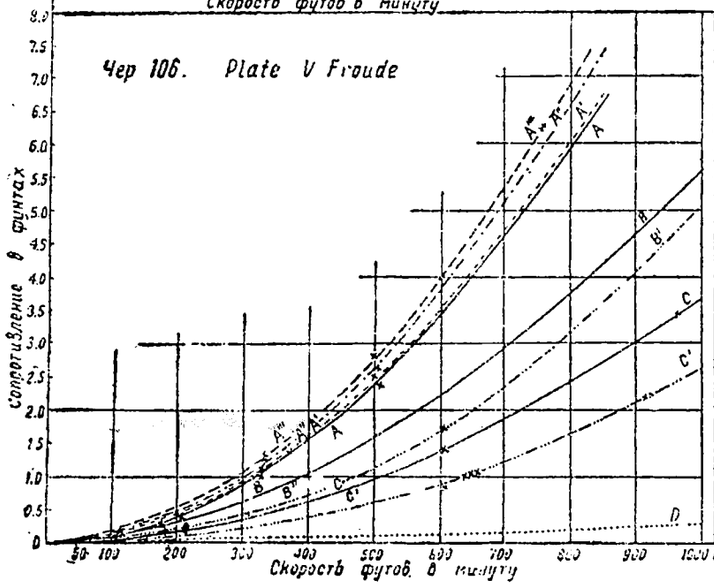
Подробности в гл. I, стр. 356—369 и в 6-м и 7-м приложениях.

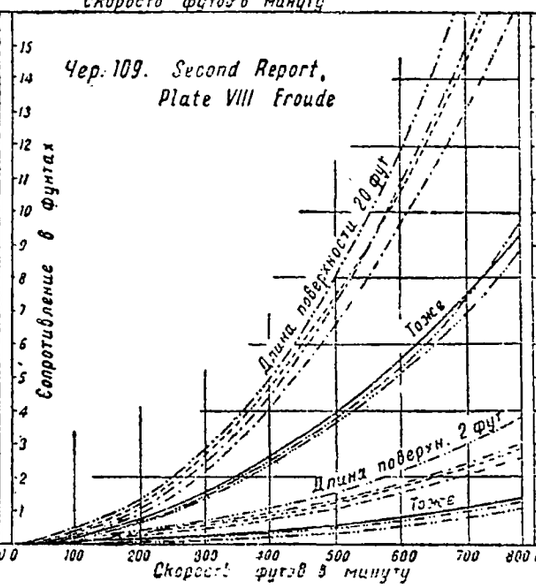
С подлинника копировал и уменьшал г. Севастьянов.

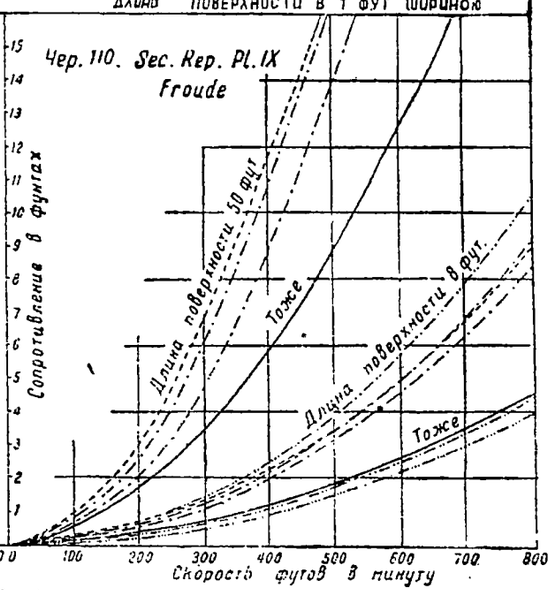












Картогр. Зав. А. Ильина. Б. Мосп. д. № 11/43.

Лист 10-й

Черт. 111, 112 и 113. Разрезы: вертикальный — поперечный, вертикальный — продольный и горизонтальный модели *A*, которой сопротивление было определено комитетом британской ассоциации (Скот-Россель, Непир, Ранкин и Фроуд). В горизонтальном разрезе (113) видны ватерлинии носа и кормы. Для носа они образуют гармоническую, а для кормы трахоидальную кривую. Около миделя, образующего круг, модель могла вращаться, так что прямолинейный нос (форштевень) был при испытании или вертикален, как на черт. 118, 119, 122, 123, 124, 125 и 126, или горизонтален, как на черт. 120 и 121. То же относится до кормы (ахтерштевня, как видно на чертежах 118—126). Размеры модели даны на рисунке, где показаны и многие сечения, чрез равные промежутки, означенные соответственными цифрами и буквами на различных разрезах. Черт. 120 и 123 (уровень воды изменен) отвечают бо́льшим скоростям ($2^1/_2 - 4^1/_2$ фута в секунду) сравнительно с другими и погружению до средины. Черт. 125 и 126 — полному погружению (глава II).

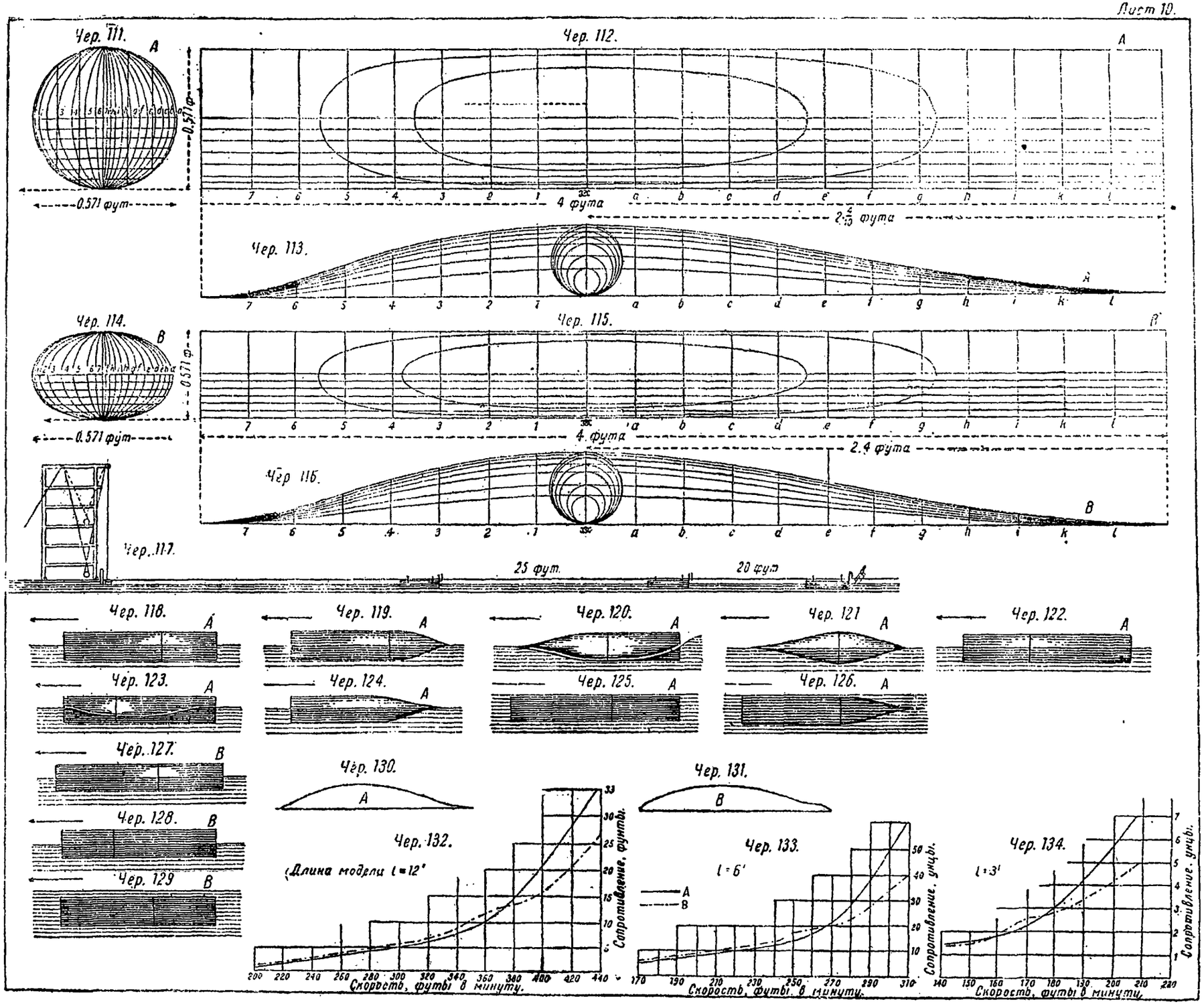
Черт. 114, 115 и 116, а также черт. 127, 128 и 129 соответствуют другой модели *B* в тех же исследованиях, способ производства которых представлен на черт. 117. Опыты произведены на озере Blackheath Park зимою и весною 1864—1865 гг.

Черт. 130 и 131. Волновые ватерлинии первых (1867 г.) моделей Фроуда, длина которых была 12, 6 и 3 фута.

Черт. 132, 133 и 134. Диаграммы опытных данных для этих моделей при различной их длине.

(Описание — глава II).

С подлинников копировал г. Севастьянов.



Картогр. Зав. А. Ильина, Б. Мист. д. № 11/13.

Лист 11-й

Черт. от 135 до 144 относятся к изложению ньютоновой и так называемой обыкновенной теории сопротивления жидкостей, изложенным в 1-м и 2-м приложениях.

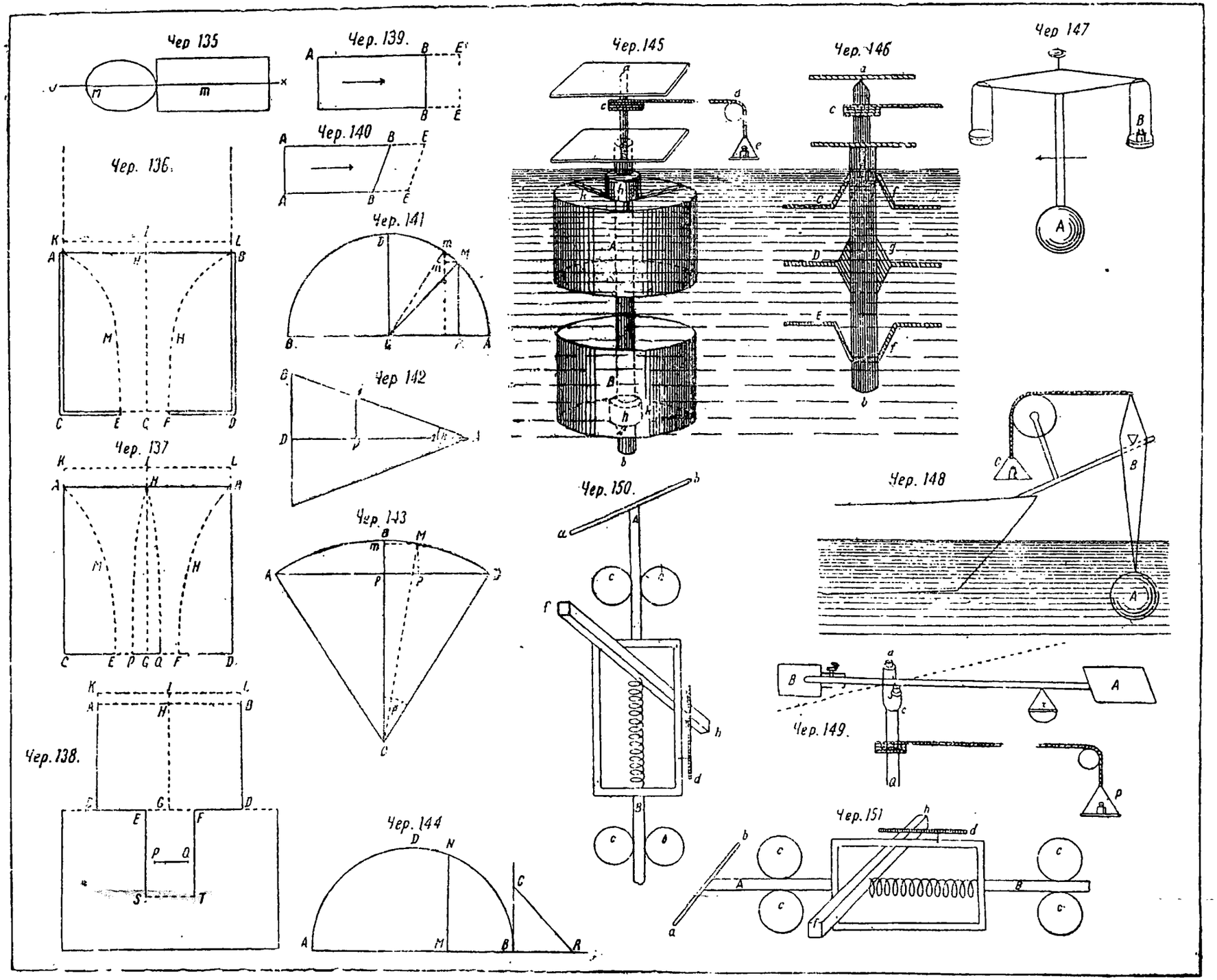
Черт. 145 и 146. Грубый чертеж проектированного мною прибора для прямого, т. е. весового, определения трения воды при вращательном движении. Для этой цели на легко вращающуюся (при помощи фрикционных колес) ось *ab* надевается или пара цилиндрических поверхностей *A* и *B*, закрепляющихся при помощи спиц *k*, *k* на скользящих втулках *h*, *h* (черт. 145), или три диска (черт. 146) *C*, *D*, *E*, сидящих на соответственных втулках *f*, *g*, *f*. Ось *ab* вращается от действия груза *e*, прикрепленного на нити, идущей чрез блок *d* и намотанной на шкив *c*. Опыт следует сделать сперва при том положении частей, какое изображено на рисунке, а потом вдвинув *B* в *A* и приложив *C* и *E* к *D*. Тогда разность грузов, потребных для сообщения прибору одинаковой скорости вращения, даст меру трения на ту разность поверхностей, которая будет у частей прибора в раздвинутом и сдвинутом состояниях (гл. I — конец).

Черт. 147. Схематический чертеж прямого весового способа определения сопротивления шара *A* при движении в воде или воздухе в направлении, означенном стрелкою. Груз *B* дает меру сопротивления (гл. II).

Черт. 148. Схематический чертеж предлагаемого мною весового (грузом *C*) способа для определения сопротивления больших моделей *A*, прикрепленных на вертикальном коромысле *B*, устроенном на носу парохода (гл. II).

Черт. 149. Проект весового определения реакционного действия воздуха на наклонную площадку *A*, укрепленную на вращающемся (от груза *P*) маховике *AB*. Этот маховик может вращаться около горизонтальной оси *ac*, а потому приподнимается при вращении оси *Q*, если в покое был горизонтален. Тогда прибавка в чашку *r* груза (песку) даст весовую меру реакционного действия (гл. II).

Черт. 150 и 151. Схема двух, единовременно действующих пружинных приборов для определения отношения между прямым и реакционным (черт. 150) сопротивлением, действующим на равные площадки *ab*, наклоненные под одними углами к направлению потока или ветра. Стержни *AB* легко движутся между колесками *cccc*. Давление определяется натяжением пружины на масштабе *d*, прикрепленном к неподвижному стержню *fh*, на котором закреплен один конец пружины. Заменяя один прибор другим и делая особые определения при уклоне 45°, можно получить данные, освобожденные от погрешностей (гл. II).



Картогр. Зав. А. Ильина. Б. Мист. д. № 11/43.