



КЛАССИКИ
ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Классики естествознания

МАТЕМАТИКА

МЕХАНИКА

ФИЗИКА

АСТРОНОМИЯ

Государственное издательство
ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
Москва·Ленинград
1949

П.Н. ЛЕБЕДЕВ

ИЗБРАННЫЕ
СОЧИНЕНИЯ

*Под редакцией
и с предисловием
проф. А.К. ТИМИРЯЗЕВА*

Государственное издательство
ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
Москва·Ленинград

1949

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА.

Первое издание Собрания сочинений великого русского физика Петра Николаевича Лебедева появилось в 1913 г. Издание было предпринято Московским физическим обществом — впоследствии имени П. Н. Лебедева — и могло осуществиться только на поступившее пожертвование от лица, пожелавшего остаться неизвестным, так как ни одно государственное учреждение дореволюционной России на такое издание не отпустило бы средств. Общая редакция была возложена на П. П. Лазарева (академика, ныне умершего) и Т. П. Кравца (теперь члена-корр. АН СССР). Работу просмотра отдельных статей, их корректуру, сличение текстов, когда статьи появлялись в разных изданиях и на разных языках, по поручению Общества взяли на себя А. П. Величковский (ныне умерший), Т. П. Кравец, П. П. Лазарев (ныне умерший), А. Б. Млодзеевский, В. И. Романов, А. К. Тимирязев, А. В. Цингер (ныне умерший) и Б. С. Швецов (ныне умерший). Издание давно разошлось и потому в настоящее время почти недоступно для широкого советского читателя.

Вот почему настоящее издание основных работ П. Н. Лебедева как нельзя более своевременно. К сожалению, у нас до сих пор нет широко доступных собраний основных сочинений наших крупнейших учёных, а выходящие издания, как, например, издание сочинений А. Г. Столетова, чрезвычайно быстро расходятся. Между тем знакомство с основными работами классиков русской науки не только долг современного поколения наших советских

учёных, но в этих работах встречаются иногда замечательные указания, позволяющие поведсти научные исследования по совершенно новому оригинальному направлению.

Так, одна из последних работ Лебедева «Магнитометрическое исследование вращающихся тел» (опубликована первая часть исследования; дальнейшие планы Лебедева известны лишь из его писем) не встретила у нас дальнейшего развития. О ней забыли, а были люди, которые думали, что это была ошибочная мысль большого учёного! Но вот стоило английскому физику П. М. С. Блэкету опубликовать в *Nature* свой доклад в Королевском обществе от 15 мая 1947 г. на тему: «Магнитное поле вращающихся массивных тел» (см. *Успехи физических наук*, т. XXXIII, вып. 1, 1947, стр. 321), как тема, над которой Лебедев работал 35 лет тому назад, стала вновь современной и интересной. Этой темой теперь заинтересовались, но ведь если бы мы с бдльшим вниманием и уважением относились к трудам наших великих учёных, то нам не было бы необходимости ждать для проявления интереса к данному вопросу 35 лет! А если внимательно изучить печатаемые в настоящем сборнике основных трудов Лебедева мысли П. Н. Лебедева, разбросанные по его сочинениям, то сколько подобных вопросов можно было бы отыскать у Лебедева, особенно в вопросе о происхождении молекулярных сил?!

Не надо забывать, что Лебедев, увлечённый тем движением в физике, которое возникло после опытов Гертца, не поплыл по общему течению, а своими работами сам указывал пути дальнейшего развития физики! Ведь в то время он первый пошёл по пути получения наиболее коротких электромагнитных волн. Он первый подтвердил предсказания Максвелла о световом давлении, и он первый разобрал сложнейший вопрос о давлении света на газы и не только подошёл к этой задаче теоретически (на основе исследования пондеромоторного действия волн на резонаторы), но и пока единственный своими опытами, которые до сих пор никто не решился повторить, доказал экспериментально существование давления света на газы!

Не подлежит сомнению, что одна из очередных задач, которые должна ставить себе наша советская физика, — это не упускать из великой сокровищницы, накопленной нашими учёными, тех блестящих научных мыслей, которые к нам потом часто возвращаются под иностранными именами, как это случилось с магнитным полем вращающихся массивных тел через 35 лет после первой работы П. Н. Лебедева!

Подавляющая часть напечатанных в настоящем сборнике работ Лебедева относится прямо или косвенно к циклу работ, связанных с давлением света на твёрдые тела и особенно на газы. К этому кругу работ относится диссертация, защищённая в Страсбурге: «Об измерении диэлектрических постоянных паров и о теории Москотти-Клаузиуса». Эта работа убедила Лебедева, что отдельные молекулы можно рассматривать как резонаторы, что сыграло решающую роль в подготовке исследования давления света на газы.

«Физические причины, обуславливающие отступления от гравитационного закона», непосредственно касаются влияния давления света на форму кометных хвостов. Далее «Опытное исследование светового давления» установило самый факт существования светового давления и показало, что величина этого давления совпадает с теоретическим предсказанием Максвелла. «Экспериментальное исследование пондеромоторного действия волн на резонаторы» является теоретическим обоснованием, опирающимся на ряд остроумно поставленных опытов, самой возможности существования давления света на газы. Эти работы завершились «Опытным исследованием давления света на газы». Работа «О двойном преломлении лучей электрической силы» стоит как будто особняком. Однако в этой работе Лебедев получил самые короткие для того времени электромагнитные волны, что им было использовано при исследовании пондеромоторного действия электромагнитных волн на электромагнитные резонаторы — «искусственные молекулы» — в той работе, которая позволила Лебедеву уверенно подойти к давлению света на газы. «Предельная величина коротких акустических волн» представляет большой инте-

рес в связи с современными работами по ультразвуку. Исследование «Термоэлемент в пустоте, как прибор для измерения лучистой энергии» интересно тем, что хотя поставленная задача касалась увеличения чувствительности измерительного прибора, однако эта работа послужила отправным пунктом для двух диссертационных работ: академика П. П. Лазарева «О явлении температурного скачка на границе твёрдого тела и разрежённого газа» (1910) и А. К. Тимирязева: «О внутреннем трении разрежённого газа и о связи явления скольжения разрежённого газа с явлением температурного скачка на границе твёрдого тела и разрежённого газа» (1914).

Наконец, последняя работа касается вопроса о магнитном действии вращающихся тел в связи с вопросом о магнетизме планет — вопрос, получивший опять большой интерес в связи с упомянутой выше работой Блэкета.

Проф. А. К. Тимирязев.

Петр Николаевич
ЛЕБЕДЕВ



**БИОГРАФИЧЕСКИЙ
ОЧЕРК**

ПЁТР НИКОЛАЕВИЧ ЛЕБЕДЕВ.

(Биографический очерк¹⁾).

Пётр Николаевич Лебедев родился в Москве в 1866 г. в купеческой семье и первоначальное образование получил в Петропавловской школе.

Ещё будучи мальчиком, он заинтересовался физическими явлениями, и этот интерес с годами выступал всё ярче и яснее, так что к 16 годам у Лебедева вполне определилось стремление к научным исследованиям. После двухлетнего пребывания в реальном училище Лебедев поступает студентом в Московское высшее техническое училище. Доступ в университет, где занятия наукой были бы более свободны, ему, как неклассику, был закрыт.

Хотя при той массе обязательной работы, выполнения которой требовала специальная техническая школа, свободного времени у него оставалось немного, однако он успевал много читать и уже в первый год своего пребывания в училище принялся за первую научную работу. Результат этого исследования, как и многих последующих, начатых в училище, был отрицательный, но это не ослабляло энергии Лебедева, и он всё больше и больше втягивался в исследования.

¹⁾ Биографический очерк написан П. П. Лазаревым для изданного в 1913 г. Московским физическим обществом им. П. Н. Лебедева Собрания сочинений Лебедева. В настоящем издании он повторен с небольшими добавлениями, взятыми из очерка проф. В. Д. Зёрнова (Учёные записки МГУ, юбилейная серия, выпуск LI (физика), 1940).

В октябре 1887 г. Лебедев переселился в Страсбург, где записался студентом. Страсбургский университет был в то время одним из наиболее крупных научных центров Германии, куда со всего мира стекались учащиеся. Нужно только упомянуть таких учёных, как физиолог Гольц, патолого-анатом Реклингаузен и первый ректор Страсбургского университета известный ботаник де Бари, чтобы понять огромное значение Страсбурга в то время; но и на этом фоне выделялся директор физического института проф. А. Кундт, в лабораторию которого с самого начала попал молодой Лебедев.

Кундт был не только крупным учёным, обогатившим науку рядом исследований, он был главой большой международной физической школы, давшей таких исследователей, как Рентген, Гальвакс, Винер, Рубенс, Дю-Буа и другие ¹⁾. Специалисты, работавшие у Кундта, стекались в его лабораторию со всего земного шара, и на еженедельных коллоквиумах, по выражению Лебедева, «дефилировали все народности, слышалась немецкая речь не только с разными местными оттенками объединённой Германии, но и со всеми теми иностранными отзвуками и неправильностями, с которыми говорят иностранцы, начиная с Сан-Франциско до Токио».

С самого начала пребывания в Страсбурге Лебедев с увлечением принялся за самостоятельную работу. В письме к матери от 20.VIII. 1888 г. он пишет: «Я никогда не думал, что к науке можно так привязаться. И если у меня отнимут физику, то я исчахну ещё в больших муках, чем Альфред дель Родриго по Эльвире».

«С каждым днем я влюбляюсь в физику всё более и более... Скоро, мне кажется, я утрачу образ человеческий, я уже теперь перестал понимать, как можно существовать без физики».

«Colloquium, который мне ещё так недавно казался не симпатичней апокалиптического зверя, теперь обратился в источник наслаждений».

¹⁾ Из русских учёных в лаборатории Кундта работали, кроме Лебедева, ещё Б. Б. Голицын, Д. А. Гольдгаммер, Г. Г. де Метц, Д. П. Коновалов, В. А. Михельсон, В. Натансон, С. Я. Терешин, В. А. Ульянин и В. С. Шелляев.

Лебедев с первого же месяца погрузился в изучение литературы. «Для меня, — пишет он в это время, — каждая страница прочитанного заключает больше удовольствия, чем труда, потраченного на усвоение: таким образом я с утра до вечера занят тем, чем я хотел заниматься с 12 лет, и у меня только одно горе — день мал». Чтобы помочь этому горю, П. Н. впоследствии уговорился с одним из своих товарищей по институту, Б. Б. Голицыным, читать литературу по частям и сообщать друг другу прочитанное за обедом. На первых же порах в Страсбурге Лебедев принялся и за самостоятельную работу, и толстая тетрадь его протоколов и проектов, сохранившаяся до последнего времени, содержит массу интересного. Несмотря на то, что многие работы были хорошо задуманы, ни одна не была доведена до конца: всё казалось П. Н. малозначащим и неинтересным; он как бы пробовал на этих первых исследованиях свои силы.

В 1888 г. Кундт перешёл профессором в Берлин, где он занял кафедру Гельмгольца. Лебедев последовал туда за ним, и год, проведённый им в Берлине, оставил неизгладимые впечатления. Кроме работы в институте у Кундта Лебедев за это время посещал лекции теоретической физики Гельмгольца.

Отношения с Кундтом были хорошие, и Кундт очень высоко ставил своего талантливую ученика. Как много в это время Лебедев работал и какое огромное количество тем рождалось в его голове, видно из одного стихотворения, написанного Кундтом в 1889 г. Начало этого стихотворения таково:

Ideen hat Herr Lebedew
Per Tag wohl zwanzig Stück,
Und für des Institutes Chef
Ist's wahrlich noch ein Glück,
Dass er die Hälfte schon verliert
Eh'er sie überhaupt probirt. 1)

1) Т. е. «У Лебедева каждый день появляется по двадцать новых идей, и для директора института поистине является счастьем, что он половину этих идей растеряет, прежде чем он попробует их осуществить».

Высоко ставя своего ученика, Кундт, естественно, и требовал от него гораздо большего, чем от других. Мне пришлось слышать от самого П. Н. об одном характерном эпизоде. Работая в Берлине в физической лаборатории, Лебедев должен был для одного из своих исследований часто пользоваться старым ртутным насосом, требовавшим постоянного подливания ртути. Дорожа своим временем, П. Н. сконструировал и сам выполнил прибор для автоматической подачи ртути. Пользуясь им, он мог во время откачки свободно уходить из своей лаборатории. В одно из таких отсутствий, когда П. Н. был на лекции у Гельмгольца, в его комнату вошёл Кундт; заметив новый аппарат Лебедева, он тотчас же позвал некоторых своих ассистентов и с жаром стал им расхваливать П. Н. как конструктора. Как раз в это время появился сам П. Н., который частью уже слышал сказанное Кундтом. Едва Лебедев переступает порог, как Кундт на него набрасывается и начинает его журить за то, что он напрасно тратит время на технические задачи и отвлекается от чистой науки. Защищаясь от таких нападков, Лебедев в одном из своих писем за это время пишет: «Кундт ругает часто за дело, но часто и потому, что у меня свой ход мыслей, у него свой, — и мы не сходимся». Однако эти споры ещё больше закрепили отношения между учителем и учеником, и Лебедев был в лаборатории Кундта одним из немногих практикантов, в работы которого Кундт не вмешивался.

«На отношение ко мне в институте, — писал Лебедев, — я не могу нахвалиться: какой аппарат ни потребовался бы для моих работ, мне его тотчас же дают, часто даже не спрашивая зачем, тогда как с другими, кажется, проделывают скучные церемонии; никто в мою работу носа не сует, я занимаюсь абсолютно самостоятельно. Если приходят, то только гости, которым я иногда кое-что показываю. Комната у меня отличная, одним словом, я в раю Магомета, и если нет поблизости чувствительных приборов — я готов прыгать и скакать козлом от удовольствия...»

Всё время П. Н. находится в приподнятом радостном настроении. Его письма к матери, в которых он описывает свою работу, искрятся радостью и шуткой и прекрасно

отражают его искания и тот наплыв идей, который мешает ему сосредоточить своё внимание на одной работе и закончить её.

«А у меня новорожденная: кричит, бунтует, ничего авторитета не признает — я, слава богу, уже оправился, совершенно здоров и хожу в институт. Крёстным был Кундт и пришёл в некоторое взвинченное настроение, когда я ему приподнёс новорожденную, — не бойся, мама, это идея относительно электричества. По совету Кундта я покуда бросил то, чем ранее занимался».

Одним из последних исследований за этот берлинский период была попытка Лебедева показать, что при достаточно тонких проводящих слоях эти последние могут терять способность защищать тела от внешнего электрического поля.

Идея этой работы привела Кундта в восторг. «Самое главное в предстоящей работе, — пишет Лебедев, — это тонкие металлические слои, осаждённые на стекле. Кундт обещался сам мне их делать по заданным мною размерам, а он первый во всём мире специалист по этому делу. Как человек нервный, он сейчас же устроил гонку: чтобы через два дня всё было готово. Я было воспротивился, так он мне пригрозил чуть не анафемой, это его манера: если ему что-нибудь не интересно, делай хоть два года, но если что заинтересовало — подавай сейчас...»

«Пользуясь остатками семестра, — пишет П. Н., — я навалился на работу — делал опыт за опытом. С самого начала января я работал каждый день, и ни одного раза у меня не было удачного опыта».

Лебедев решил на время оставить эти исследования и засесть за докторскую диссертацию.

Случайные обстоятельства не позволили ему докторировать в Берлине. Реалист по образованию, Лебедев не знал древних языков, которые были ему необходимы, чтобы сдать докторский экзамен в Берлине, и после долгого колебания Лебедев решил переселиться в Страсбург, где для получения степени доктора латинский язык не был нужен.

В Страсбурге, в институте проф. Кольрауша, Лебедев с головой ушёл в работу и скоро начал получать первые результаты предположенного исследования. Его письма в это время постоянно содержат пометки: «Мои работы продвигаются очень удачно вперёд».

Наконец, после докторского экзамена и представления диссертации («Об измерении диэлектрических постоянных паров и о теории диэлектриков Моссотти-Клаузиуса») Лебедев получил в 1891 г. докторскую степень.

Чтобы понять значение первой экспериментальной работы и уяснить себе весь дальнейший ход идей Лебедева, нужно знать, что незадолго до этого времени появились исследования Гертца, показавшие, что электромагнитные возмущения могут распространяться в виде колебаний в эфире, и что эти лучи «электрической силы», как их называл Гертц, представляются, таким образом, совершенно аналогичными световым колебаниям. Эти работы, подтвердившие впервые мысль Максвелла об электромагнитной природе светового луча, требовали и ряда дальнейших следствий. Одним из них было следующее: если свет есть электромагнитное явление, то, попадая на молекулу, он может вызывать в ней те же явления, которые в окружающих телах вызывает электромагнитный луч, а так как эти действия будут зависеть от характера тела, на которое падает луч (от его проводимости и т. д.), то прежде всего представлялось необходимым изучить электрические свойства отдельных молекул, из которых построено тело. Если эти молекулы будут представлять собой совершенные проводники и если их размеры будут малы в сравнении с размерами междумолекулярных промежутков, то, как это показал Клаузиус, можно легко вычислить диэлектрическую постоянную среды. Был сделан ряд опытов с искусственными средами, состоящими из диэлектрика и проводника (ртутная мазь), и опыты показали согласие с теорией. Лебедев ставит себе задачу исследовать электрические свойства молекул, другими словами — задачу выяснить, подчиняется ли газ, состоящий из отдельных, свободных, не соединённых в одно компактное целое молекул, законам, открытым Клаузиусом, или нет. Но прежде чем выполнить эту за-

дачу, Лебедеву приходится разработать самый метод, и его метод, явившийся дальнейшим развитием метода Гопкинсона, позволил ему с поразительной точностью выполнить необходимые измерения.

Проверка заключений Клаузиуса относительно связи диэлектрической постоянной и пространственного наполнения оказалась неожиданно хорошей. Только у алкоголя П. Н. получил расходящиеся результаты, причём эти расхождения легко могли быть объяснены изменчивостью самой величины диэлектрической постоянной именно для алкоголя. Изменение степени наполнения молекулами пространства достигалось или изменением давления или же изменением температуры газа. Наконец, пользуясь уравнением состояния вещества в том виде, как его дал Ван-дер-Ваальс, Лебедев показывает, что порядок величин, теоретически вычисленных из данных теории для пространственного наполнения и непосредственно наблюдаемых на опыте, один и тот же. Результат всей работы Лебедев формулирует так:

а) Предположения Фарадея, что молекулы представляют собою электрически проводящие тела, или, как это делают Маскар и Жубер, что молекулы имеют чрезвычайно высокую диэлектрическую постоянную, не приводят ни к каким противоречиям с наблюдаемыми явлениями и объясняются очень простым образом.

б) Соотношение Лоренца может быть применимо с выгодой, как эмпирическая формула, связывающая плотность тела с диэлектрической постоянной его.

Таким образом в простейшем случае было показано, что электрическое поле может действовать на молекулы и что эти последние могут быть рассматриваемы при этом, как абсолютно проводящие тела определённых размеров,— как резонаторы.

Одновременно с исследованием диэлектрической постоянной газов Лебедев предпринимает изучение теорий кометных хвостов и довольно скоро получает верное представление о силах, обуславливающих это явление. По этому поводу он пишет:

«Я, *кажется*, сделал очень важное открытие в теории движения светил, специально комет», и далее: «Найденный

закон распространяется на все небесные тела. Сообщил Винеру¹⁾, сперва он объявил, что я с ума сошёл, а на другой день, поняв, в чём дело, очень поздравлял. Сперва я был в сильном нервном напряжении, но теперь, когда закон доказан, — я ничуть не волнуюсь, частью, может быть, оттого, — этого я не скрою, — что озадачен, даже ошеломлён его общностью, которую сначала не предусматривал. Выведенный мной закон не есть дело минутного наития: около *двух* лет ношу я его зачатки. Вопрос, которым я занят издавна, я люблю всей моей душой, так, как, я себе представляю, родители любят своих детей».

Изучение теории кометных хвостов и установление причины отталкивания хвоста от солнца заставило Лебедева сделать и дальнейшие выводы из этих представлений, выводы, уже всецело принадлежащие молекулярной физике.

Внутри тела, которое состоит из отдельных молекул — резонаторов, эти последние могут давать электрические колебания определённого периода, действующие на соседние молекулы, и это может обусловить либо притяжение, либо отталкивание отдельных частичек. Молекулярные силы, обуславливающие растворение, диффузию, осмотическое давление и т. д., могут быть сведены, таким образом, на взаимное действие молекул — резонаторов, если только можно показать, что резонаторы действительно могут друг на друга механически влиять. Но здесь встречается огромное затруднение, так как, несмотря на всё желание открыть силы взаимодействия резонаторов, самые опытные исследователи их открыть не могли. Однако случайное обстоятельство заставляет Лебедева взяться за трудное исследование механических сил в резонаторах, — именно, изучение теории кометных хвостов. Бессель и Ольберс²⁾ показали, что форма кометного хвоста может быть объяснена допущением отталкивательной силы, идущей от солнца и действующей об-

1) Впоследствии профессор университета в Лейпциге.

2) Здесь не упомянуты работы Бредихина, о которых Лебедев говорит в своих исследованиях. См. «Об отталкивательной силе лучеиспускающих тел», стр. 60, «Экспериментальное исследование пондеромоторного действия волн на резонаторы», стр. 84. (Прим. ред.)

ратно пропорционально квадрату расстояния от солнца. Природу этой силы Бессель искал в электрических отталкиваниях; Лебедев же, следуя теории Максвелла, полагал, что свет может давить на молекулу, и закон этого давления был достаточен, чтобы объяснить существующие формы кометных хвостов. А так как сама молекула является резонатором и свет есть электромагнитное переменное поле, то ясно, что такое поле должно оказывать механическое действие на резонатор. Поэтому разрешение вопроса о пондеромоторных силах в резонаторах тесно связано в работах Лебедева с его представлением о силах в хвостах комет.

Эти важные и интересные вопросы развиваются у Лебедева параллельно с его диссертационной работой, и уже 4 января 1891 г. он отмечает в дневнике: «Для сочинения о силах давления при волнообразном движении у меня начинается план», и далее он излагает на четырёх страницах проект будущих работ, который содержит в себе все те следствия, которые были доказаны в его позднейших исследованиях. На последнем коллоквиуме в Страсбурге Лебедев сообщил о своих исследованиях по давлению лучистой энергии, причём по этому поводу в одном из писем он пишет:

«Сегодняшний день (20 июля 1891 г.) — день очень важный в моей жизни: сегодня я в последний раз говорил в Colloquium'e об вопросе, который вот уже 3 года занимает меня непрерывно: о сущности молекулярных сил. Два часа битых я говорил и показывал опыты, которые удались мне так, как редко удаются».

Вскоре после коллоквиума, где Лебедев выставил как бы программу всей своей будущей деятельности, он покидает Страсбург и переселяется в Москву, где А. Г. Столетов предлагает ему место ассистента. Прощаясь с Страсбургом, Лебедев пишет:

«Какова будет моя дальнейшая судьба — я только вижу туманное пятно с большим знаком вопроса. Одно знаю, я буду работать, куда глаза видят и голова свежа».

По возвращении в Москву нужно было прежде всего обеспечить себе возможность продолжать научную работу.

Старая физическая лаборатория университета, где пришлось Лебедеву устраиваться на первых порах, была очень мала и не приспособлена к тем задачам, которые он себе ставил. Помещалась она в верхнем этаже маленького двухэтажного дома во дворе старого здания Университета, причём зала общего практикума находилась по соседству с комнатами для научных работ. Эти неудобства не смутили, однако, Лебедева, и он с жаром принялся за организацию лаборатории, причём прежде всего завёл хорошую мастерскую, где можно было бы готовить необходимые приборы. Средств на это требовалось немного, но и этих небольших средств часто не хватало, и Лебедев рассказывал впоследствии, как он привёл в ужас А. Г. Столетова, заказав разных принадлежностей для мастерской на 300 руб. Покончив с этим оборудованием лаборатории, Лебедев с головой ушёл в научные исследования. Одновременно он принимает очень горячее и деятельное участие в научной работе московских учёных обществ и совместно с Б. Б. Голицыным (в то время лаборантом физической лаборатории) организует при Обществе любителей естествознания, антропологии и этнографии ряд докладов и обзоров по новейшим успехам физики. Наконец, ряд публичных лекций на самые разнообразные, животрепещущие темы физических наук включает многогранную деятельность Лебедева. Вообще этот период московской жизни является едва ли не наиболее деятельным периодом жизни П. Н. Работы, предпринятые П. Н. в это время, касались развития его основных идей о взаимодействии резонаторов.

В 1894 г. появляется первая работа Лебедева, посвящённая действию волн на резонаторы, и в трёх работах, появившихся одна за другой, Лебедев выясняет закон этих действий. Метод, которым он пользовался, состоял в том, что электрические, акустические или гидродинамические колебания, возбуждающиеся соответствующими источниками колебаний, падали на подвижный резонатор и отклоняли его от его первоначального положения. Противодействуя этому отклонению и измеряя силу, возникающую при этом, можно измерить влияние периода падающей волны на величину взаимодействия.

Результаты исследования могут быть формулированы так:

а) Механическое действие возбуждающей волны на резонатор пропорционально падающей энергии и зависит от отношения чисел колебаний, а не от их абсолютной величины.

б) Если резонатор настроен выше, чем возбуждающий источник колебаний, то он им притягивается, и это притяжение имеет максимум вблизи самого резонанса и при переходе через резонанс обращается в отталкивание, которое уменьшается вместе с увеличением расстройки резонаторов.

По отношению к акустическим резонаторам, которые вместе с гидродинамическими давали совершенно тождественные законы, были замечены и некоторые особенности: «Здесь,— пишет Лебедев,— открылась одна особенность явления, которая представлялась для меня совершенно неожиданною: в то время, как в непосредственной близости от источника закон пондеромоторного действия акустической волны на её резонатор тождествен с соответствующим законом для электромагнитных, а также и для гидродинамических колебаний, при постоянном увеличении расстояния это тождество постепенно ступенькается, и его место занимает новый закон, совершенно отличный от предыдущего: так, при малых расстояниях наблюдается вблизи резонанса при переходе через него изменение от максимального притяжения через ноль (при полном резонансе) к максимальному отталкиванию резонатора источником, тогда как при увеличении расстояния от последнего притяжение, понемногу сглаживаясь, наконец совершенно исчезает, и его место заступает отталкивание». Лебедеву удаётся показать теоретически, что вдали от источника (при плоской волне) такой случай должен быть и для электромагнитных волн, и в русской докторской диссертации он прибавляет: «В природе подобное явление (в более сложной форме) представляет собою отталкивательное действие солнечных лучей на газовые молекулы кометных хвостов».

Работы Лебедева над пондеромоторными силами в резонаторах доставили ему русскую степень доктора, которую, по ходатайству Московского университета, он получил без предварительного магистерского экзамена и без представления магистерской диссертации.

Покончив с опытами над моделями, Лебедев делает попутно изящную с технической стороны работу «О двойном преломлении лучей электрической силы».

Герц, поставив свой вибратор, дававший электромагнитные волны с длиной волны 60 см, показал, что эти волны распространяются, отражаются, интерферируют так же, как и световые волны. Лебедев получил электромагнитные волны, в сто раз более короткие (6 мм), и благодаря этому дополнил опыты Герца установлением того факта, что электромагнитные волны, как и оптические, дают явление двойного лучепреломления при прохождении через двойкопреломляющий кристалл. Эта работа Лебедева важна также в том отношении, что она убедительно показала возможность получения электромагнитных волн, по своей длине приближающихся к инфракрасным, что служило веским подтверждением молодой в то время электромагнитной теории света¹⁾.

Все приборы П. Н. — подлинно ювелирной работы. Они демонстрировались потом в Болонской академии итальянским физиком Риги, который сам занимался получением коротких электромагнитных волн, но не получил таких малых, как П. Н. При возвращении приборов Риги писал Лебедеву: «В то же время, как Вы получите это письмо, Вы получите и Ваши маленькие приборы, которыми я пользовался в Академии Наук в Болонье. Физики, которые принимали участие в заседании, были весьма удивлены этими приборами».

По завершении работ с короткими электромагнитными волнами Лебедев берётся за главную задачу своей жизни — за доказательство, что свет давит на молекулы и что, следовательно, эти последние могут притягиваться или отталкиваться под влиянием взаимного излучения, и прежде всего он предпринимает более простую техническую задачу — задачу, которая вернее обещала успех: за давление света на твёрдые тела.

¹⁾ В заполнении промежутка между электромагнитными и инфракрасными волнами большую роль сыграли после Лебедева работы М. А. Левитской и в особенности работы А. А. Глаголевой-Аркадьевой. (Прим. ред.)

В трактате по электричеству и магнетизму Максвелл указывает на теоретический воображаемый опыт, который мог бы показать давление света на твёрдые тела. Классическая работа П. Н. Лебедева над механическим действием световых волн, доложенная им на парижском конгрессе 1900 г. и напечатанная затем в *Annalen der Physik* в 1901 г., является осуществлением мысли Максвелла. В опытах П. Н. Лебедева световой луч от вольтовой дуги падал на заключённое в сосуде лёгкое крылышко и, закручивая нить, на которой было прикреплено это последнее, давал возможность измерять механическое действие давления света. С другой стороны, зная падающую на крылышко энергию из калориметрических наблюдений и отражательную способность крылышка, можно было то же давление вычислить по формуле Максвелла. Опыты дали прекрасно совпадающий с теорией результат и показали впервые, что свет действительно давит на тела. Главнейшим затруднением в опытах Лебедева были радиометрические силы, которые П. Н. Лебедев в высшей степени простым и удобным способом сумел исключить.

Насколько сложны и трудны были эти опыты, видно из того, что ряд блестящих экспериментаторов, например Бартоли и Крукс, несмотря на огромные усилия и ловкость, не могли дать решения этой задачи, и вопрос, теоретически разработанный, оставался открытым с точки зрения эксперимента. Решение его, однако, находилось не только в связи с общим ходом идей Лебедева, но и было тесно связано, как тогда представлял это П. Н., с обоснованием самой электромагнитной теории, и поэтому Лебедев с тем большим рвением взялся за дело, что успех для него был несомненен. Однако между началом работы и её окончанием прошёл огромный промежуток времени, в течение которого пришлось изучить все стороны явления и главным образом добавочные радиометрические силы, найти пути, которыми можно их значительно уменьшить, и, наконец, только после этого исследования были блестяще закончены и существование светового давления несомненным образом доказано. Конец этих исследований не лишён некоторого интереса. Измученный предшествовавшей педагогической работой и

экзаменами, П. Н. в течение лета 1900 г. чувствовал себя настолько плохо, что не мог сам производить тех механических манипуляций, которые были связаны с исследованием, и при наблюдениях ему помогал служитель при физическом кабинете. Однажды во время опыта из-за случайного толчка при откачке тонкая нить с прибором, обнаруживавшим давление, оборвалась, и прибор был испорчен; больному П. Н. не представлялось возможным снова строить свой прибор, и он, хотя и не считал своё исследование вполне законченным в смысле точности, нашёл необходимым опубликовать его в том виде, в каком оно находилось в этот момент.

Каково было впечатление от этой замечательной работы на учёный мир, лучше всего видно из слов В. Томсона (Кельвина), сказанных К. А. Тимирязеву: «Вы, может быть, знаете, — говорил Кельвин, — что я всю жизнь воевал с Максвеллом, не признавая его светового давления, и вот ваш Лебедев заставил меня сдать перед его опытами».

В. Крукс в письме к Лебедеву по поводу этой работы между прочим писал: «Вам удалось найти метод открытия и измерения крайне малых сил непосредственного давления света, и притом тогда, когда они маскируются и осложняются гораздо большими радиометрическими силами».

Известный уже своими первыми работами, поставившими его в ряды хороших экспериментаторов, этой работой Лебедев завоевал себе сразу почётное имя, из хорошего учёного он сразу стал первоклассным физиком, и в настоящее время нет учебника, где бы его работа о световом давлении не цитировалась.

За работу о световом давлении на твёрдые тела Академия наук присудила П. Н. премию.

Блестяще обосновав учение о световом давлении на твёрдые тела, П. Н. тотчас же переходит к вопросу о воздействии лучистой энергии на молекулы, как на резонаторы, — к давлению света на газы. Помимо чисто физического значения этой работы она имела и огромное космическое значение. Как указано выше, П. Н. принадлежит идея объяснения кометных хвостов давлением световых лучей, и в настоящее время учение о давлении света на газы имеет

во всех отделах астрофизики колоссальное значение. Если первая работа о световом давлении была трудна, то вторая задача представлялась на первый взгляд просто невыполнимой. Расчёты Шварцшильда, сделанные им, правда, в совершенно определённых предположениях (для отражающих тел), показали, что если уменьшить размеры металлических частиц до величины молекул, то давление лучистой энергии делается настолько малым по отношению к притяжению, которое испытывает всякая весомая частица со стороны окружающих тел, что эффекта давления нельзя наблюдать, и Аррениус даже основал на этих расчётах теорию ряда метеорологических явлений, рассматривая роль космической пыли в междупланетном пространстве. Правда, как выяснилось впоследствии, рассуждения Шварцшильда не могли относиться к молекулам, и П. Н., вооружённый своими предшествующими опытами с резонаторами, ясно это видел; однако необходимо было огромное теоретическое предвидение, огромная уверенность в результатах, чтобы взяться за это исследование, чтобы его довести до конца. Нельзя перечислить всех тех вариантов опытов, которые были сделаны, чтоб открыть явление; достаточно сказать, что окончательных приборов, — приборов, с которыми были сделаны измерения, — было построено до двадцати. Много раз казалось, что исследование даёт вполне отрицательный результат, что нельзя устранить побочных пертурбирующих сил, что наблюдать явление невозможно, и всякий раз Лебедев находил зацепку, которая позволяла ему сделать новый вариант опыта, чтобы иметь возможность до конца довести всё то, что было им блестяще задумано. Наконец, в 1910 г. исследование было закончено и появилось в печати.

Метод, которым работал Лебедев, состоял в том, что лучи света, проходя через газ, заключённый в коробке, разгороженной стенкой на два отделения, приводили его в круговорот. Если исключить те движения газа, которые зависят от неравномерности нагревания различных слоёв, то весь эффект должен зависеть только от светового давления, и это давление можно измерить, поместив в тёмной части коробки небольшой поршень, не прилегающий к стенкам, на который газ будет давить при своём движении.

Чрезвычайно важным обстоятельством, которое могло обеспечить результат опыта, было устранение тепловых движений газа, зависящих от неравномерности нагревания, и это обстоятельство разрешается Лебедевым очень простым и изящным способом. Газ вообще плохой проводник тепла, и только водород проводит тепло очень хорошо; поэтому, подмешав ко всем исследуемым газам водород, можно настолько хорошо выравнять температуру в различных слоях, что конвекция, зависящая от нагревания, не будет давать сколько-нибудь заметного эффекта. Освещая слой то с одной, то с другой стороны, и одновременно замечая отклонение поршня, можно измерить величину давления световых лучей на газ.

Одним из первых учёных, поздравивших Лебедева с его замечательным открытием, был Шварцшильд, который писал Лебедеву 9 февраля 1910 г.: «Я хорошо помню, с каким сомнением я услышал в 1902 г. о вашем предположении измерить давление света на газ, и я преисполнен тем большим удивлением, когда я прочёл, как вы устранили все препятствия». За работы по давлению лучистой энергии Королевский институт Великобритании избрал Лебедева в 1911 г. в свои почётные члены.

Здесь, может быть, не безынтересно указать, что самая мысль о давлении на газ зародилась почти одновременно с общей мыслью о давлении света. Ещё в 1894 г. мы находим в дневнике П. Н. следующую запись: «Давление светового луча на газ удобно, пожалуй, исследовать для газов в видимом спектре (NO_2 , J, Br, Cl) в аппарате, напоминающем конвекционный термометр Joule'я, а, пожалуй, и радиометр».

Далее следует подробное описание прибора. Был ли прибор конструирован и испробован, об этом не осталось никаких данных ни в записях, ни в личных беседах П. Н., но интересно то, что самая мысль о возможности явления была уже в то время совершенно ясна для Лебедева.

В период работ по световому давлению на газ П. Н. много работал над вопросом о движении земли в эфире; из этих работ опубликован только один небольшой опыт, являющийся изменением опыта Роуланда; всё остальное,

как не давшее каких-нибудь положительных результатов, оставлено Лебедевым без напечатания. Но если просмотреть все приборы, спроектированные им для этих опытов, можно удивляться как поразительному его конструкторскому таланту, так и замечательному умению побеждать встречающиеся трудности, и эти неопубликованные исследования едва ли не больше, чем всё напечатанное, оправдывают слова проф. В. Вина, что Лебедев «владел искусством экспериментирования в такой мере, как едва ли кто другой в наше время».

Наконец, последние работы, начиная с 1909 г., были посвящены магнетизму вращения и были вызваны замечательным открытием Геля, обнаружившего магнитные явления вокруг солнечных пятен.

Уже 2 апреля 1909 г., как раз после того коллоквиума в университете, где было доложено о работе Геля, П. Н. пишет в дневнике: «Занимаюсь земным магнетизмом в связи с открытием Геля магнитности солнечных пятен». Далее идёт изложение его воззрений, которые сводятся к тому, что всякое вращающееся тело должно благодаря движению давать разделение положительных и отрицательных зарядов в молекуле и как следствие этого — магнитное поле. Ряд опытов, оконченных в 1911 г., однако, не дал в этом отношении положительных результатов и даже показал, что все допущения относительно такой делимости зарядов неверны. Эти опыты были оборваны смертью Лебедева на самом ходу¹⁾.

В 1911 г. П. Н. вместе с рядом других прогрессивно настроенных профессоров вышел из университета.

События, которые привели к столь тяжёлому для него решению, развернулись таким образом. 11 января 1911 г. в связи со студенческими «беспорядками» было опубликовано постановление «о недопущении в стенах высших учебных заведений студенческих собраний и вменении в обязанность полицейским чинам принимать быстрые

¹⁾ В письмах П. Н. есть указания, что он предполагал поставить новые опыты «чудовищной трудности» для определения магнитного поля вращающихся тел большой массы. (Прим. ред. См. также предисловие редактора.)

и решительные меры против них». Ректор Мануйлов, пом. ректора Мензбир и проректор Минаков в знак протеста против этого постановления подали прошение об освобождении их с административных должностей, однако министр Кассо уволил их не только с административных, но и с профессорских должностей. Совет университета послал министру протест, а затем целый ряд профессоров демонстративно покинул стены университета. Ушёл Умов, ушёл Тимирязев, ушёл Зелинский, ушёл ближайший друг Петра Николаевича А. А. Эйхенвальд. Эти события чрезвычайно взволновали Лебедева, к тому времени уже тяжело больного, окружённого многочисленными учениками и, несмотря на болезнь, поглощённого научной работой. После тяжкого раздумья, после бессонных ночей П. Н. решил уйти. Лебедев ушёл из университета, ушли за ним и его ученики.

Этот последний период работы П. Н. является наиболее трагическим в его жизни. Сознание тяжёлой болезни, которая уже с 1901 г. начала сказываться припадками, часто не дававшими спать, сознание необеспеченности и себя и семьи очень удручали П. Н., и единственное утешение он находил в это время в тех успехах, которые делали его ученики.

Тотчас после ухода Лебедева из университета два учреждения, именно: Главная палата мер и весов и Нобелевский институт в Стокгольме, сделали попытки привлечь его в число своих работников. Директор Палаты проф. Н. Г. Егоров предполагал пригласить П. Н. в качестве научного сотрудника после предполагаемого преобразования Палаты. В то же время директор физико-химической лаборатории Нобелевского института проф. С. Аррениус писал Лебедеву: «Естественно, что для Нобелевского института было бы большой честью, если бы Вы пожелали там устроиться и работать, и мы, без сомнения, предоставили бы Вам все необходимые средства, чтобы Вы имели возможность дальше работать». Передавая далее детали возможного устройства в институте, Аррениус писал: «Вы, разумеется, получили бы совершенно свободное положение, как это соответствует Вашему рангу в науке».

Эти предложения давали возможность продолжать научную работу и вполне освобождали от педагогической деятельности, что вполне совпадало со вкусами Лебедева и доставляло большое нравственное удовлетворение. Но принятие их не обеспечивало возможности продолжать руководить учениками, пошедшими за учителем и доверившими ему свою судьбу.

И Лебедев, несмотря на все предстоящие трудности, принял третье предложение. Городской университет им. Шанявского в Москве предложил отпустить средства на организацию нового «лебедевского подвала» (в физическом институте университета ученики Лебедева занимали подвальное помещение), где могли бы работать сам учитель и его ученики. В короткое время нашлось помещение в частном доме в Мёртвом переулке, теперь уже сознательно в подвальном этаже, так как чувствительные приборы в жилом доме, не приспособленном для физической лаборатории, лучше устанавливать прямо на полу подвального этажа. В этом же доме, в одном из верхних этажей, находится и квартира для самого П. Н. Выписываются приборы, организуется мастерская с тем же верным А. И. Акуловым в качестве механика, и, как по волшебству, через три месяца новый «лебедевский подвал» начинает свою научную работу. Однако здоровье П. Н. не выдержало бессонных ночей, волнений, связанных с уходом из университета, хлопот по организации новой лаборатории. Уже в январе 1912 г. приступы сердечной болезни сильно обострились, в феврале П. Н. слег в постель, а 1 (14) марта его не стало.

Не только учёный мир России с Академией наук во главе откликнулся на смерть Лебедева, но и западные учёные и прежде всего Лондонский королевский институт прислали выражения своего соболезнования. Среди полученных основанным П. Н. Московским физическим обществом телеграмм и писем (числом около 100) имеются, между прочим, письма от Аррениуса, Рентгена, Нернста, Рубенса, Варбурга, Томсона, Крукса, Ленарда, Риги, Кюри и целого ряда других учёных.

Теперь мы переходим к другой стороне научной деятельности П. Н., именно к работам практикантов. Сознание

необходимости таких работ возникло у Лебедева очень рано. Рано развившись умственно, богато одарённый от природы, с чрезвычайно быстрой реакцией на окружающее, Лебедев ещё в молодости почувствовал, что масса вопросов и идей, которые ему приходят в голову, подавляет его, не даёт ему необходимого покоя для работы, и он начинает стремиться сознательно освободить себя от этих идей передачей тем своим ученикам. Ещё в 1893 г., незадолго до того времени, когда он взял под своё руководство нескольких практикантов, он писал в дневнике: «Обилие мыслей и проектов не даёт мне спокойного времени для работы». Вначале, не имея самостоятельной лаборатории, Лебедев наладил специальные исследования в лаборатории проф. А. П. Соколова, и в это время под его руководством делали работу шесть специалистов. Вскоре после переселения в новый физический институт университета, когда Лебедев получил в заведывание лабораторию, это число удвоилось, а в последний год жизни Лебедева коллектив его учеников состоял уже из 28 человек.

Все работы, которые выполняли ученики П. Н., стояли в ближайшем отношении к его собственным работам, часто являясь дополнениями к главной теме, которую вёл сам П. Н.

Так, в период работ по световому давлению в лаборатории Лебедева возникла целая серия работ по давлению лучистой энергии. Пользуясь аналогиями, Лебедев предполагал существование такого давления и в звуковых колебаниях и в водяных волнах. Работы Альтберга и Капцова решили этот вопрос, а вслед за тем работа Зёрнова позволила применить метод давления для абсолютных измерений силы звука наряду с диском Рэлея. Этот же метод давления позволил далее обнаружить самые короткие звуковые волны в воздухе и открыть затухание акустических волн в воздухе в зависимости от длины волны.

Другая серия работ была тесно связана с электрическими колебаниями и является продолжением работ самого П. Н. в этой области; таким образом возникли работы по абсорбции электрических колебаний (Романов), по исследованию незатухающих волн (Щодро), работа по магнитным свойствам тел для частых колебаний (Аркадьев). Наконец,

эти работы завершились конструированием особого спектрографа для инфракрасных лучей, который позволял автоматически отмечать поглощение в различных лучах спектра. Идея такого прибора возникла ещё в конце 90-х годов и несколько раз менялась в представлении П. Н., пока, наконец, не получила ту форму, которая описана в *Physikal. Zeitschrift*¹⁾.

Масса побочных вопросов также получила разрешение (например, работы Эсмарха по магнитной защите). Лаборатория работала, таким образом, по определённом плану, по определённой программе, намеченной П. Н. Самые темы работ, прежде чем давались практикантам, многократно обдумывались самим П. Н., и он часто говаривал тем из своих учеников, которым приходилось самостоятельно руководить научными исследованиями, следующее: «Никогда не предлагайте начинающему такого вопроса, который не давал бы ясного ответа и путь для разрешения которого не был бы определённым».

Это требование применял ещё в более категорической форме и к своим темам сам П. Н., и поэтому среди работ, им предложенных, не бывало неудавшихся. В них не было экспериментирования наудачу, всегда была определённая цель и ясно выработанный метод для решения коренного вопроса.

Чтобы быть в курсе всех работ своих специалистов, П. Н. должен был подолгу обдумывать детали этих исследований, и мне часто приходилось заставлять П. Н. далеко за полночь за обсуждением работ его практикантов. Уезжая за границу для отдыха, П. Н. часто не мог удержаться и посылал одно за другим письма, в которых указывал на необходимые дополнения к работе или на какие-либо изменения в ней.

Насколько интересны были его беседы в лаборатории, настолько же оживлённы и поучительны были его замечания на еженедельных коллоквиумах, которые возникли в 1901 г. в старой лаборатории и из которых потом выросло новое Московское физическое общество, основателем которого

¹⁾ П. Н. Лебедев, *Phys. Zeitschr.* 80, 145 (1903).


был П. Н. В этих коллоквиумах все, с начинающего студента и кончая их руководителем, чувствовали себя членами большой семьи, и таким путём получалось то объединение работающих, которое всегда отличало лебедевскую лабораторию.

Лебедевская лаборатория в Мёртвом переулке просуществовала после смерти П. Н. ещё пять лет. В ней продолжалась научная работа, из неё вышли работы, начатые ещё при П. Н. Таковы работы А. К. Тимирязева «О внутреннем трении в разрежённом газе и о связи скольжения газа по поверхности металла с явлением температурного скачка», работа Г. Б. Порты «Исследование диэлектрической постоянной газов и паров». В лаборатории продолжали работать начинающие физики — уже «внуки» Петра Николаевича. За эти пять лет возник физический институт на Миусской площади. Он отвлёк средства от Мёртвого переуллка, и в 1917 г. маленький «лебедевский подвал» перестал существовать. Ныне физический институт на Миусской площади, о котором только мечтал в последний год своей жизни П. Н. и для постройки которого он давал первоначальные задания, перешёл в ведение Всесоюзной Академии Наук и носит имя дорогого учителя.

П. Лазарев.

ИЗБРАННЫЕ
СОЧИНЕНИЯ





ОБ ИЗМЕРЕНИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОСТОЯННЫХ ПАРОВ И О ТЕОРИИ ДИЭЛЕКТРИКОВ МОССОТТИ-КЛАУЗИУСА.

Диссертация на степень доктора, представленная физико-математическому факультету Страсбургского университета.

Введение.

Относительно диэлектрических постоянных паров пока имеются лишь измерения Клеменчица¹⁾, сделанные по методу, оказавшемуся весьма удобным для низкокипящих веществ.

Целью настоящего опытного исследования было выработать метод, годный для паров высококипящих веществ, и испытать его на определении диэлектрических постоянных некоторых паров. Имелось в виду также и отыскание какой-нибудь связи между найденными диэлектрическими постоянными паров и известными уже диэлектрическими постоянными этих же веществ в жидком состоянии. Такая связь вытекает из теории диэлектрической поляризации, выработанной на основании идей Фарадея сначала Моссотти, а потом Клаузиусом. При некоторых предположениях Клаузиус нашёл связь между относительным заполнением пространства веществом и диэлектрической постоянной этого последнего. Так как пока ещё нет опытной проверки этой теории, то я и пытался её произвести во второй половине настоящей статьи на основании имеющегося опытного материала.

¹⁾ I. K l e m e n č i č, Wien. Ber. (2) 91,712 (1885); Exner's Rep. 21, 571 (1885); Weibl. 10, 109 (1886).

Опытная часть содержит:

§ 1. Метод.

§ 2. Приборы.

§ 3. Встречающиеся ошибки.

§ 4. Результаты измерений.

§ 5. О возможных изменениях метода.

Теоретическая часть (§ 6) содержит проверку теории Моссотти-Клаузиуса.

Позволяю себе выразить здесь мою сердечную благодарность профессору Ф. Кольраушу за помощь и интерес, которые он постоянно уделял моей работе.

§ 1. Метод измерения.

Диэлектрические постоянные паров определялись из измерения ёмкостей, причём сравнивались между собой два приблизительно равных конденсатора, из которых один имел постоянную ёмкость, а в другом диэлектриком служил то воздух, то испытуемый пар.

Обозначим соответственно через C' и C'' ёмкости второго конденсатора с воздухом и с паром и через K' и K'' соответственные диэлектрические постоянные воздуха и пара; тогда

$$\frac{K''}{K'} = \frac{C''}{C'}. \quad (1)$$

Отношение ёмкостей конденсаторов определялось по несколько изменённой методе Гопкинсона¹⁾.

Определение велось следующим образом (см. рис. 1).

Внутренние обкладки конденсаторов, постоянно соединённые между собою и с электрометром, отводились к земле, после чего внешние обкладки заряжались соответственно до потенциалов $+(V_1 + \Delta')$ и $-(V_2)$. Здесь V_1 и V_2 обозначают потенциалы обеих ветвей батареи B_1 и B_2 , а Δ' — ту электродвижущую силу, которая прибавлялась к $(+)$ ветви включением соответствующей части сопротивления, замыкавшего вспомогательный элемент N .

¹⁾ Hopkinson, Proc. Roy. Soc. of London 26, 298 (1877); Beibl. 1, 565 (1877).

Затем соединение с землёй внутренних обкладок прерывалось, и после этого каждая внешняя обкладка разъединялась с батареей и соединялась с землёй; тогда электрометр вообще даёт некоторое отклонение.

Если мы подберём Δ' так, чтобы электрометр оставался в покое, то количества электричества, наведённые в обоих конденсаторах (с ёмкостями C и C'), будут по абсолютной величине одинаковы:

$$C(V_1 + \Delta') - C'V_2 = 0, \quad (2)$$

$$\frac{C'}{C} = \frac{V_1 + \Delta'}{V_2}.$$

Из двух наблюдаемых отклонений электрометра для величин Δ'_1 и Δ'_2 можно, как известно, путём интерполяции найти величину Δ' .

Так как при измерении диэлектрических постоянных паров важно определить отношение (2) с точностью до одной десятитысячной, а при многочасовой длительности опытов нельзя предполагать необходимого для такой точности постоянства батареи, то для независимости от колебаний её электродвижущей силы приходилось перемещать последовательно ветви батареи одну на место другой, что при приблизительном равенстве ветвей и конденсаторов было удобно выполнить.

Обозначим соответственно через Δ'_+ и Δ'_- прибавляемые к (+)-ветви батареи электродвижущие силы, когда постоянный конденсатор C заряжается положительно или, соответственно, отрицательно; из (2) следует:

$$\frac{C'}{C} = \frac{V_1 + \Delta'_+}{V_2} = \frac{V_2}{V_1 + \Delta'_-},$$

$$\left(\frac{C'}{C}\right)^2 = \frac{V_1 + \Delta'_+}{V_1 + \Delta'_-}. \quad (3)$$

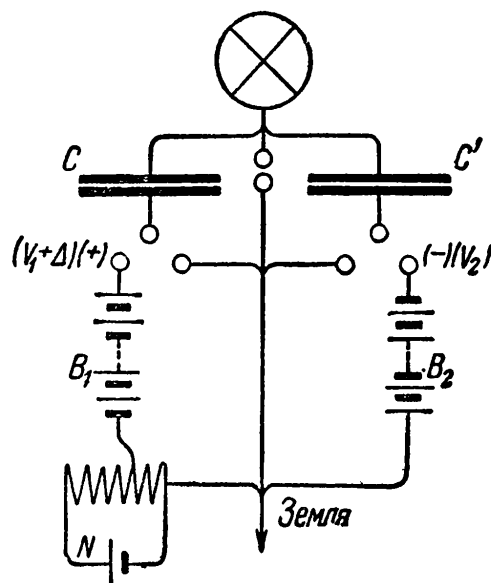


Рис. 1.

При каждом наполнении конденсатора должно быть сделано по два отсчёта для определения величин Δ'_+ и Δ'_- и один для нулевой точки электрометра. При желании оградить себя от случайных ошибок установки электрометра следует повторить ряд наблюдений; так как при сильном колебании комнатной температуры нулевая точка чувствительного электрометра медленно смещается, а состояние ветвей батареи непрерывно изменяется, то целесообразно повторить ряд наблюдений в обратном порядке: если отсчёты делались в равные промежутки времени, то отпадают ошибки, проистекающие от постепенного изменения со временем батарей и электрометра.

При настоящих опытах двукратное повторение описанного двойного ряда давало 20 отдельных отсчётов, из которых и были вычислены величины Δ'_+ и Δ'_- .

Если переменный конденсатор наполнен воздухом, то его ёмкость C' определяется из величин C , V_1 и Δ'_+ и Δ'_- по формуле (3); если он наполнен паром, то его ёмкость C'' определяется из соответствующих величин C , V_1 и Δ''_+ и Δ''_- . Искомое отношение (1) может быть поэтому написано так:

$$\frac{K''}{K'} = \frac{C''}{C'} = + \sqrt{\frac{(V_1 + \Delta''_+)}{(V_1 + \Delta''_-)} \cdot \frac{(V_1 + \Delta'_-)}{(V_1 + \Delta'_+)}}. \quad (4)$$

Приняв во внимание, что в (4) V_1 велико относительно других величин, можно вывести следующее соотношение:

$$K'' = K' \left[1 + \frac{(\Delta''_+ - \Delta''_-) - (\Delta'_+ - \Delta'_-)}{2V_1} \right]. \quad (5)$$

Здесь K' — диэлектрическая постоянная воздуха, отнесённая к пустоте, диэлектрическая постоянная которой принята $= 1$; она известна из измерений Больцмана¹⁾ и Клеменчича²⁾.

Единицей электродвижущей силы служил нормальный элемент батареи; таким образом, если потенциал $V_1 = n$, то n обозначает число элементов в ответвлении батареи.

¹⁾ L. Boltzmann, Wien. Ber. (2) 69, 812 (1874); Pogg. Ann. 155, 403 (1875). G. Wiedemann, Electr. 2, 50 (1883).

²⁾ I. Klemenčič, цит. выше, стр. 736.

§ 2. Приборы.

1) *Расположение приборов и переключатель-качалка.*

Встречающиеся при измерении ёмкостей переключения частей цепи обслуживались переключателем в виде качалки, схематически представленным на рис. 2.

В лёгкую дощечку длиной около 27 см, прикреплённую к жёсткой пружине R , вставлены изолированные шел-

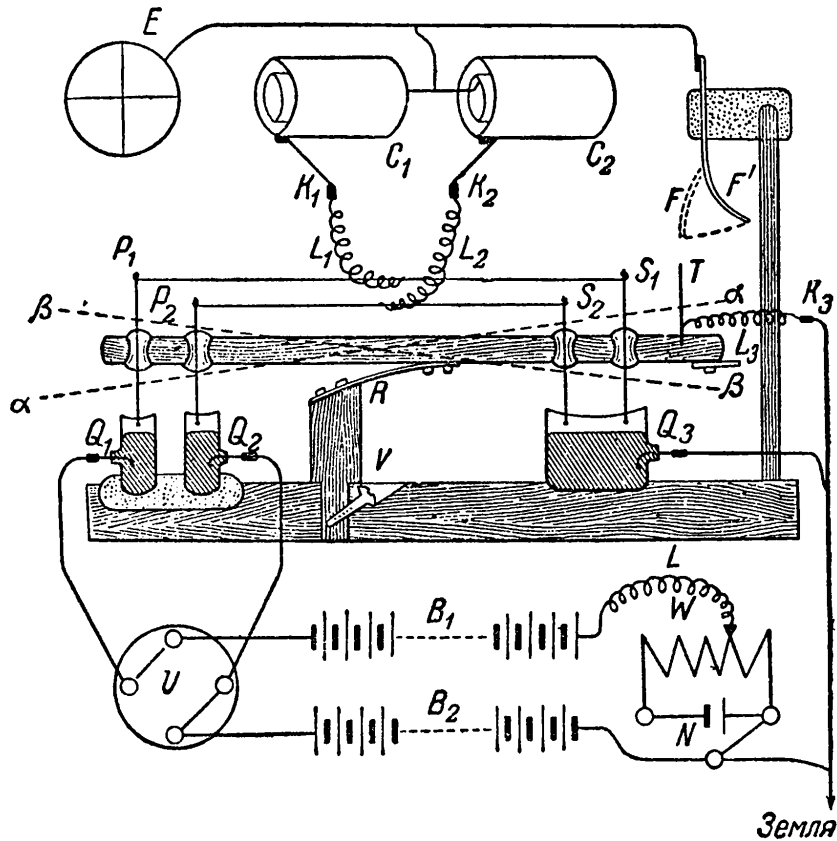


Рис. 2.

лаком платиновые штифтики P_1 , P_2 , S_1 и S_2 , попарно соединённые между собой и, помощью тонких гибких проводников L_1 и L_2 , с внешними обкладками конденсаторов C_1 и C_2 ; металлический штифт T соединён гибким проводником L_3 с землёю.

Дощечка может быть приведена в положение $\alpha\alpha$ и закреплена в нём посредством зажима (не помещённого на рисунке); лёгкое нажатие освобождает зажим, и дощечка поворачивается в положение $\beta\beta$ и здесь защёлкивается.

Если привести дощечку в положение aa после того, как пружина F' сдвинута в F , то внешние обкладки конденсаторов C_1 и C_2 при помощи соответственных проводников L_1 и L_2 , P_1 и P_2 , изолированных шеллаком чашечек со ртутью Q_1 и Q_2 и переключателя U соединяются с соответственными ветвями батареи B_1 и B_2 ; внутренние обкладки и электрометр E через посредство пружины F , штифта T и проводника L_3 отводятся к земле.

При повороте дощечки в положение $\beta\beta$ вблизи положения равновесия происходит следующее: сперва разъединяются с землёй внутренние обкладки вместе с электрометром, так как пружина F отходит от штифта T и перемещается в положение F' , затем внешние обкладки разъединяются с батареей и, наконец, через посредство штифтиков S_1 и S_2 и чашечки со ртутью Q_3 они соединяются с землёй. Дощечка поворачивается дальше и защёлкивается в положении $\beta\beta$.

Переключатель U позволяет перемещать одну на место другой ветви батареи B_1 и B_2 . С помощью ответвления замкнутого на большое сопротивление W нормального элемента N можно было изменять потенциал ветви B_1 на дробные части одного элемента.

Дощечка качалки делала 14 полных колебаний в одну секунду при амплитуде первого в 25 мм. Вышеописанное переключение происходило уже при передвижении на 3 мм и длилось менее, чем 0,002 сек. Отвинтив винт V и освободив зажимы K_1 , K_2 и K_3 , можно было снять дощечку для чистки переключателя.

2) *Конденсатор с паром* (рис. 3). Жидкость, пар которой должен был быть исследован, находилась в сосуде-капельнике T , который посредством ртутного запора Q насаживался на трубку R ; жидкость капала в стеклянную трубочку R и из неё попадала в латунную трубку W (диаметр $d=2,5$ см, длина $l=60$ см), которая, согласно Видеману¹⁾, была наполнена медными стружками. Как трубка W , так и стеклянная муфта M , в которой находился конденсатор, нагревались в цилиндрической паровой бане DD

¹⁾ E. Wiedemann, Pogg. Ann. 157, 3 (1876).

до температуры 100° Ц. или 125° Ц., контролируемой тремя термометрами; в первом случае для нагревания служила вода, во втором — амиловый спирт.

В трубке W исследуемая жидкость испарялась, и её пар нагревался до температуры бани; через проводящую трубку Z , вставленную на каучуковой пробке K в трубку

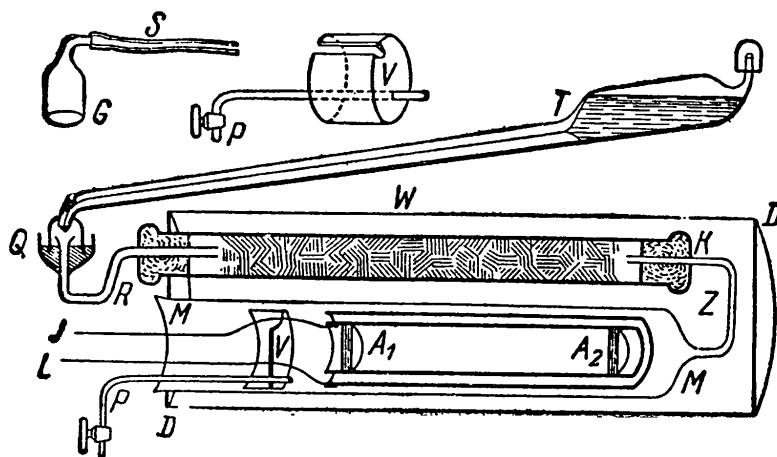


Рис. 3.

W , пар переходил в стеклянную муфту MM , где находился конденсатор.

Конденсатор состоял из двух concentрических, густо никелированных латунных трубок (внешний диаметр внутренней трубки $d_1 = 2,5$ см, внутренний диаметр наружной $d_2 = 2,9$ см, длина $l = 49$ см), изолированных друг от друга четырьмя кварцевыми пластиночками, которые, согласно Тегетмейеру и Варбургу¹⁾, были вытесаны параллельно оптической оси.

Так как внутренняя трубка была закрыта двумя асбестовыми пробками A_1 и A_2 , а просвет между наружной трубкой и стеклянной муфтой был заполнен ватой, то пар должен был течь между обкладками конденсатора.

Для того чтобы пары, значительно более тяжёлые, чем воздух, не наполняли одну только нижнюю часть конденсатора, вставлялся латунный вкладыш V (он в увеличенном

¹⁾ F. Tegetmeier und E. Warburg, Wied. Ann. 32, 444 (1887).

виде изображён в перспективе наверху рис. 3); если кран трубки P закрыт, то пар может уходить только через выходное отверстие, сделанное вверху вкладыша, и должен, следовательно, сперва наполнить весь конденсатор. Через это выходное отверстие проходил также и проводник J (жёсткая медная проволока) к внутреннему цилиндру конденсатора, тогда как проводник L к внешнему цилиндру лежал на стеклянной стенке.

Давая подходящий наклон капельнику T , можно было регулировать число капель, а следовательно, также и скорость пара в конденсаторе.

Когда нужно было заменить пар воздухом, капельник T снимался, и на его место помещался колокол G , который каучуковой трубкой S и помещёнными за ней сушильными и промывными приборами соединялся с воздушным газометром. Можно было как угодно долго пропускать ток воздуха, высасывая посредством насоса через трубку P более тяжёлые пары.

3) «Нормальным» конденсатором для сравнения служил воздушный конденсатор, состоявший из двух концентрических латунных трубок, диаметры которых были такие же, как и у конденсатора с паром; внешняя трубка была, однако, длиннее ($L = 60$ см), а внутренняя, напротив, короче ($l = 45$ см) и от первой была изолирована пластиночками шеллака. Во внутреннем цилиндре находилась латунная трубка (диаметр $d = 2$ см), которую можно было более или менее выдвигать и тем несколько менять ёмкость нормального конденсатора.

Перед началом опытов последний регулировался так, чтобы его ёмкость была на несколько тысячных больше ёмкости парового конденсатора, когда тот был наполнен воздухом, и меньше, когда тот был с паром.

4) Две батареи состояли из 100 элементов Кларка каждая; 190 из них были приготовлены по образцу проф. Квинке ¹⁾; величина внутреннего сопротивления каждого элемента была от 100 до 130 омов, так что каждая ветвь

¹⁾ G. Quincke, Verhandl. d. Naturforscherversam. zu Bremen, Abth. 2, p. 53. Leipzig, 1890.

батареи имела внутреннее сопротивление от 10 000 до 13 000 омов.

Десять элементов имели обычную большую форму и могли быть отдельно сравниваемы электрометрически с замкнутым нормальным элементом по методу компенсации.

Таким же образом производилось сравнение каждых десяти элементов батареи с десятью калиброванными элементами. Относительное изменение электродвижущей силы батареи в продолжение трёх месяцев было меньше пяти тысячных.

5) *Нормальный элемент*, по которому определялось напряжение батареи, был элемент Кларка с малым внутренним сопротивлением; в продолжение опыта он замыкался через сопротивление в 10 000 омов, что не влияло заметным образом на электродвижущую силу.

В течение исследования элемент был замкнут в общем не менее, чем 100 часов, и в заключение показал падение электродвижущей силы менее чем на пять тысячных, — величину, на которую разнились между собой к концу опытов также и незамкнутые элементы.

Переключатель позволял соединять с землёю то один, то другой полюс элемента; посредством штепселя можно было ответвлять соответствующую электродвижущую силу.

6) *Электрометр* был типа Маскара; стрелка его заряжалась сухим элементом, а одна пара квадрантов соединялась с землёю.

Для элемента Кларка электрометр давал в одну сторону отклонение больше чем на 600 делений шкалы. При зарядках конденсатора разность в 0,1 элемента заряжающей ветви батареи давала отклонение от 20 до 25 делений шкалы, так что могло быть уже замечено изменение ёмкости менее чем на 0,0001.

Проводники к электрометру и качалке находились в металлических соединённых с землёю оболочках.

7) *Переключательная доска* состояла из чашечек со ртутью, помещённых на шеллаковых палочках; с её помощью производить желаемые соединения можно было быстро и надёжно (ср. § 3).

8) У *термометров*, указывавших температуру паровой бани, были определены точки кипения.

9) Для определения атмосферного давления служил *барометр* Фортена.

§ 3. Источники ошибок и их исследование.

Измеряемое «число электризации» («Elektrisirungsza'hl») паров было $(K'' - 1) < 0,01$, и потому являлось весьма желательным определять ёмкость конденсатора с точностью до $\pm 0,0_31$. Соответственной чувствительности измерения можно достичь, с одной стороны, посредством увеличения зарядного потенциала, а с другой — повышением чувствительности электрометра; являющиеся источники ошибок могут, однако, сильно повлиять на желаемую точность и потому должны быть тщательно исследованы.

Источники ошибок распадаются на: 1) случайные, 2) погрешности изоляции, 3) временно-меняющиеся и 4) постоянные.

1) *Случайные ошибки.*

а. Ошибки в отсчёте (электрометра, термометров, барометра); таковые были при настоящих исследованиях далеко ниже требуемых границ ошибок и не могли оказывать никакого существенного влияния.

б. Нечистота употреблявшихся жидкостей могла быть только весьма незначительна; не мог также производить никакого существенного влияния и растворённый в них воздух.

в. Сотрясение батареи или конденсаторов может вызывать значительные неправильности и потому должно быть тщательно избегаемо.

г. Поверхность ртути в чашечках качалки должна была быть всегда зеркальна; при нечистой поверхности электрометр давал неопределённо-переменные установки.

2) *Погрешности в изоляции*, поскольку они не касались парового конденсатора, могли быть только случайными. В паровом конденсаторе изоляция зависела от пропускавшегося пара: в то время как с воздухом заряд держался в течение минут без потери, с водяным паром мне не удалось установить достаточной изоляции. (Кипячение

в течение целых часов кварцевых пластинок в дистиллированной воде давало только незначительный результат.) Пары бензола, толуола и этилового эфира не оказывали никакого заметного влияния на изоляцию, а другие исследованные пары — напротив, и в различной мере.

Какое влияние эти погрешности производят на результат, будет сказано ниже; здесь же следует упомянуть об их исследовании.

а. Изоляция проводов, внутренних обкладок и электрометра для меньших напряжений испытывалась тем, что после соединения с землёю внешних обкладок конденсатора прикосновением пальца к пружине F' (см. рис. 2) система заряжалась приблизительно на $1/2$ вольта, и наблюдалось уменьшение отклонения электрометра.

б. Изоляция конденсаторов при высоких напряжениях (около 150 вольт) исследовалась тем, что внутренние обкладки отводились к земле, а внешние соединялись с батареей, после чего внутренние изолировались от земли: при полной изоляции стрелка электрометра должна была оставаться в покое, в противном случае стрелка начинала двигаться и через некоторое время выходила из пределов шкалы. Чтобы при определении ёмкости электрометр во время переключения качалки (т. е. в 0,002 сек.) получал вследствие проводимости отклонение меньше чем на одно деление шкалы, нужно было, чтобы при опыте ход стрелки в течение 0,002 сек. был менее чем на одно деление шкалы или в одну секунду менее чем на 500 делений шкалы, что всегда и выполнялось.

в. Изоляция внешних обкладок конденсатора относительно земли должна быть настолько хороша, чтобы соединение с батареей изменяло электродвижущую силу последней менее чем на $0,0_31$ всей её величины или, при 100 элементах, менее чем на 0,01 одного элемента. Для исследования этого обе ветви батареи соединялись с помощью проводника одноимёнными полюсами друг против друга; свободный полюс одной ветви отводился к земле, а свободный полюс другой соединялся с электрометром, причём последний давал постоянное отклонение, происходившее от неравенства обеих ветвей батареи (меньшее чем на 0,2 эле-

мента); если производилось теперь соединение проводника, связывающего обе ветви батареи с внешней обкладкой одного из конденсаторов, и это влияло на напряжение отведённой к земле батареи, то изменялось соответственно и отклонение электрометра. Наблюдалось всегда, что нормальный конденсатор не производил никакого влияния, а паровой конденсатор оказывал его, но меньше чем на 0,002 элемента.

3) *Ошибки, проистекавшие от изменений в приборах с течением времени.* Сюда относятся все изменения, которые проистекают от не поддающихся дальнейшему контролю причин и которые происходят в течение времени опыта (от 3¹/₂ до 4 часов).

а. Как исключались изменение электродвижущей силы ветвей батареи и смещение точки нуля электрометра посредством подходящего расположения наблюдений, говорилось уже в § 1.

б. Колебания электродвижущей силы нормального элемента контролировались многократным сравнением в течение опыта этого элемента с двумя произвольно выбранными элементами батареи по электрометрической компенсационной методе; колебания оказывались ниже ошибок наблюдения (около 0,002).

в. Вследствие колебаний температуры паровой бани меняется ёмкость парового конденсатора, который может различным образом расширяться. опыты дали для промежутка температуры от 20° Ц. до 100° Ц. изменение ёмкости в 0,045 на один градус Цельсия. Так как температура обыкновенно колебалась только на несколько десятых градуса, то этой ошибкой можно было пренебречь. Следует пренебречь и непосредственным влиянием колебания атмосферного давления на плотность исследуемого пара.

г. Если сравнить различные определения ёмкости одного ряда опытов, то окажутся отклонения в среднем в $\pm 0,032$, что частью объясняется сильными колебаниями комнатной температуры, отражавшимися на нормальном конденсаторе. Чтобы не делать прибор слишком сложным, я должен был отказаться от бани для нормального конденсатора.

Ещё большие колебания, свыше $\pm 0,001$, которые оказались для муравьиноэтилового и пропионоэтилового эфиров, следует рассматривать как случайные.

4) *Постоянные источники ошибок.* Под этим названием объединяются те источники ошибок, которые присущи самим приборам и не могут быть исключены. Из них Клеменчич особенно выдвигает следующие: 1) поглощение паров металлическими обкладками конденсатора, вследствие чего уменьшается между ними расстояние, и 2) постоянную, не зависящую от диэлектрика конденсатора диэлектрическую постоянную изолирующих прокладок, которые в известных местах отделяют друг от друга обе обкладки. В моих опытах температура была по меньшей мере градусов на 20 Ц. выше температуры кипения исследуемой жидкости, а расстояние между обкладками конденсатора — около 2 мм; с другой стороны, кварцевые пластиночки были выбраны столь малыми, что занимали меньше одной тысячной всего промежуточного пространства между обкладками конденсатора. Этими источниками ошибок можно поэтому пренебречь. Кроме их, являлись ещё два других.

а. При вытеснении пара воздухом (или наоборот) в конденсаторе неизбежно остаётся немного пара (или, соответственно, воздуха); в связи с этим вычисленная диэлектрическая постоянная должна быть меньше действительной.

При опытах перед началом измерений пропускался объём воздуха (или, соответственно, пара), превышавший от 30 до 100 раз объём подогревателя W (см. рис. 3), и принималось, что подмеси тогда было меньше одного процента.

б. Наибольшим источником ошибок являлась, однако, недостаточность в изоляции конденсатора при наполнении его парами некоторых жидкостей. Количество электричества, переходящее во время переключения вследствие проводимости на внутренние обкладки, было относительно малой помехой; но так как проводимость здесь была электролитического характера, то после разряжения появлялась поляризация и влияла на отклонения электрометра: стрелка не устанавливалась неподвижно, а медленно смещалась. При бензоле, толуоле и этиловом эфире смещения были незаметны, при других парах они доходили до 5 делений

шкалы за те 30 секунд, в течение которых отсчитывалась установка электрометра; отсюда возникла ошибка в определении ёмкости парового конденсатора, но она была менее чем в $0,0_32$.

При пропионоэтиловом эфире установки электрометра были более ненадёжны, а при водяном паре колебания в отклонениях электрометра были так велики, что нельзя было сделать никакого измерения.

Устранения этих источников ошибок можно было бы, однако, достигнуть (см. § 5) только существенными видоизменениями парового конденсатора.

§ 4. Диэлектрические постоянные некоторых паров.

Жидкости, пары которых исследовались, были получены от К. Ф. Кальбаума в Берлине; обозначенные звёздочкой * служили уже ранее г-ну Терешину для его исследований, остальные были свежедоставленные.

Измерения давали отношение диэлектрической постоянной пара к таковой же воздуха при температуре парового конденсатора и наличном давлении атмосферы.

Диэлектрическая постоянная K' воздуха по Больцману и Клеменичу равна $K' = 1,0_359$ при 760 мм и 0° Ц. ; принимая во внимание, что величина $(K - 1)$ пропорциональна плотности газа, найдём диэлектрическую постоянную воздуха при 760 мм :

при 0° Ц.	$K' = 1,0_359,$
» 100° Ц.	$K' = 1,0_343,$
» 120° Ц.	$K' = 1,0_341,$
» 126° Ц.	$K' = 1,0_340.$

С помощью этих величин для воздуха были вычислены диэлектрические постоянные паров и приведены к 760 мм давления.

Как пример здесь могут быть приведены два ряда наблюдений из ряда опытов № 14. В нижеследующей таблице обозначают: R' — нулевую точку электрометра, E'_1, E'_2, E'_3 и E'_4 — его установки после разряда конденсаторов, соответ-

ствующие прибавочным электродвижущим силам Δ'_{1+} , Δ'_{1-} , Δ'_{2+} и Δ'_{2-} (см. § 1); из них могут быть найдены интерполяцией величины Δ'_+ и Δ'_- . Такое же значение имеют и величины с двойным значком ".

Воздух. $T = 100^\circ \text{Ц}$. $B = 764 \text{ мм}$.

	R'	Δ'_{1+}	E'_1	Δ'_{1-}	E'_2	Δ'_{2+}	E'_3	Δ'_{2-}	E'_4
4 ч. 45 м.	474	$\pm 0,0$	472	$+ 0,3$	476	$+ 0,1$	451	$+ 0,4$	451
4 » 55 »	76	»	73	»	77	»	49	»	53 \downarrow
4 » 56 »	\downarrow 78	»	76	»	81	»	54	»	58
5 » 04 »	81	»	81	»	81	»	53	»	62 \downarrow
Средние величины	477	$\pm 0,0$	475	$+ 0,3$	479	$+ 0,1$	452	$+ 0,4$	456

Этиловый спирт. $T = 100^\circ \text{Ц}$. $B = 764 \text{ мм}$.

	R''	Δ''_{1+}	E''_1	Δ''_{1-}	E''_2	Δ''_{2+}	E''_3	Δ''_{2-}	E''_4
6 ч. 04 м.	492	$+ 0,5$	511	$- 0,2$	478	$+ 0,6$	492	$- 0,3$	501
6 » 13 »	95	»	12	»	84	»	92	»	04
6 » 14 »	\downarrow 95	»	14	»	80	»	91	»	05
6 » 22 »	97	»	15	»	82	»	92	»	07
Средние величины	495	$+ 0,5$	513	$- 0,2$	481	$+ 0,6$	492	$- 0,3$	504

Стрелки указывают последовательность рядов наблюдений.

Оказывается при подсчёте:

$$\begin{aligned} \text{при } E'_1 \text{ и } E'_3 & \quad \Delta'_+ = - 0,009, \\ \text{» } E'_2 \text{ » } E'_4 & \quad \Delta'_- = + 0,309, \\ \text{» } E''_1 \text{ » } E''_3 & \quad \Delta''_+ = + 0,586, \\ \text{» } E''_2 \text{ » } E''_4 & \quad \Delta''_- = - 0,261. \end{aligned}$$

По формуле (5) можно вычислить диэлектрическую постоянную K'' пара, положив $K' = 1,0,43$ и приняв во внимание, что число элементов заряжающей ветви батареи было $n = 90$.

$$K'' = K' \left(1 + \frac{(\Delta''_+ - \Delta''_-) - (\Delta'_+ - \Delta'_-)}{2n} \right) =$$

$$= 1,0,43 \left(1 + \frac{+0,847 + 0,318}{180} \right);$$

$$K'' = 1,00690.$$

Приняв во внимание, что у газов величина $(K - 1)$ прямо пропорциональна давлению и что во время опыта давление атмосферы было $B = 764$ мм, получим для диэлектрической постоянной пара этилового спирта при 760 мм давления и температуре 100° Ц. величину:

$$K = 1,00686 \text{ или, округлив, } K = 1,0069.$$

Таблица I.

Диэлектрические постоянные паров при 760 мм.

N		T	I	II	III	IV	K
4	Бензол	100	1,0030	1,0028	1,0028	1,0026	} 1,0027
8	»	100	27	27	26	26	
7	»	100	28	27	—	—	
18	Толуол	125	1,0044	1,0043	—	—	} 1,0043
1	Этиловый эфир	100	1,0045	1,0044	1,0046	1,0046	
13	» »	100	43	42	46	45	} 1,0045
15	» »	100	45	44	46	—	
6	Метиловый спирт	100	1,0056	1,0057	1,0057	1,0057	
5	» »	100	58	57	—	—	} 1,0057
14	Этиловый спирт	100	1,0069	1,0065	1,0067	1,0067	
2	» »	100	62	59	—	—	
3	» »	100	60	60	—	—	} 1,0065
11	» »	100	69	69	—	—	
10	*Муравьинометиловый эфир	100	1,0071	1,0068	1,0069	1,0069	} 1,0069
9	*Муравьиноэтиловый эфир	100	1,0033	1,0090	1,0083	1,0076	
12	*Уксуснометиловый эфир	100	1,0073	1,0072	—	—	} 1,0073
16	*Пропионоэтиловый эфир	119	1,0151	1,0136	—	—	
17	*Пропионоэтиловый эфир	122	146	271	—	—	} 1,0140

Один «большой» ряд опытов обнимает пять переменных наполнений, а именно: воздухом — паром — воздухом — паром — воздухом. Четыре разности ёмкостей дают четыре величины для диэлектрической постоянной, которые указаны в колоннах I, II, III и IV.

В таблице буква N обозначает порядковый номер ряда опытов, а буква K — среднюю величину диэлектрической постоянной для температуры опыта T .

Для этилового эфира Клеменчич нашёл при 0°Ц. и 760 мм $K = 1,0074$, тогда как из моих опытов следует $K = 1,0061$.

Несмотря на все старания, мне не удалось определить диэлектрическую постоянную водяного пара, так как в его присутствии кварцевая изоляция парового конденсатора при 125°Ц. отказывалась уже служить. Из предварительных опытов, которые производились в воздушной бане при температуре свыше 160°Ц. , величина K для водяного пара оказывалась равной $1,001$, но её, однако, надо рассматривать только как указание на порядок самой величины.

§ 5. Об измерениях диэлектрических постоянных паров.

Полученные опытные указания относительно выработанного метода могут быть сведены к следующему:

а. Настоящий метод имеет то преимущество, что не зависит от ёмкостей и остаточных зарядов соединительных проводников и качалки; с применёнными вспомогательными приспособлениями он даёт точность отдельного измерения в $\pm 0,0_3 1$.

б. Малые колебания в величине ёмкости нормального конденсатора, происходящие от изменения комнатной температуры, могли бы быть устранены помещением нормального конденсатора в ту же паровую баню, где находится и конденсатор с паром.

в. Для устранения вредных влияний поляризации в паровом конденсаторе можно было бы помещать изолирующие ножки, на которых покоится внутренняя обкладка, не на внешней обкладке, а на металлических пластинках, соединённых с землёю; тогда при заряджении с внешних обкладок

на внутренние не могло бы перейти никакого заряда, и поляризация была бы исключена.

г. При употреблении конденсатора с паром, свободно вытекающим в атмосферу, диэлектрическая постоянная пара может быть определена с точностью в $\pm 0,0_32$; этот метод может быть применим в тех случаях, в которых по каким-нибудь причинам изоляция не может быть приложена в горячем паровом пространстве и механическое соединение обеих обкладок конденсатора приходится делать снаружи. Замкнутый конденсатор, однако, следует предпочесть вследствие малого расхода жидкости и быстрого чередования измерений; проводник к внутренней обкладке можно ввести внутрь через кварцевое окошко.

д. Маленькое изменение в устройстве качалки позволило бы сделать измерения гораздо надёжнее: при данном на рис. 2 расположении приборов паровой конденсатор остаётся постоянно в соединении с электрометром и влияет на его отклонение своей проводимостью и поляризацией всё то время, пока тот устанавливается (свыше 30 секунд); такое влияние можно уменьшить, разъединя тотчас же по окончании разрядки паровой конденсатор от электрометра и нормального конденсатора, что может быть выполняемо самой же качалкой.

§ 6. Проверка теории Моссотти-Клаузиуса.

На основании фарадеевского¹⁾ предположения, что диэлектрики состоят из шарообразных, проводящих, друг с другом не соприкасающихся телец, Моссотти²⁾ развил математическую теорию диэлектрической поляризации; он исследовал вопрос таким же образом, каким Пуассон исследовал магнитную индукцию, и выводил отсюда общие свойства диэлектриков.

1) M. Faraday, Exp. Res. 14, Art. 1679.

2) F. O. Mossotti, Bibl. Univ. de Genève (Arch. des Sc. phys. et nat. 6, p. 193, 1847; Memoria di mat. e di fis. della Soc. Ital. d. Sc. residente in Modena 14 (2), p. 49, 1850).

Независимо от Моссотти пришёл к аналогичному толкованию диэлектрической поляризации и Клаузиус¹⁾. Предположив, что проводящие молекулы имеют шарообразную форму и что их расстояние велико по сравнению с их диаметром, он нашёл простую зависимость между относительным заполнением пространства g (т. е. отношением действительно занятого молекулами тела объёма к видимому объёму, занимаемому всем телом) и диэлектрической постоянной K тела, а именно:

$$g = \frac{K-1}{K+2}, \quad (6)$$

$$K = \frac{1+2g}{1-g}. \quad (7)$$

Диэлектрическая постоянная вещества зависит, таким образом, только от относительного заполнения им пространства.

Несколько иначе выводятся эти положения у Г. Видемана²⁾ и у Пуанкаре³⁾.

Маскар и Жубер⁴⁾ исследуют вопрос, представляя сперва шарообразные молекулы непроводящими телами с большой диэлектрической постоянной; для предельного случая, когда молекулы непроводящи и имеют чрезвычайно большую диэлектрическую постоянную (или когда они уже суть проводники), получаются соотношения (6) и (7).

Если из формулы (6) образовать выражение:

$$\frac{d}{g} = \frac{K+2}{K-1} \cdot d = D = \text{const}, \quad (8)$$

где d обозначает плотность вещества, при которой диэлектрическая постоянная его равняется K , то отношение $\left(\frac{d}{g}\right)$ для одного и того же вещества есть величина постоянная, и D есть «наибольшая плотность» вещества или плотность

1) R. Clausius, *Mechan. Wärmetheorie. Zweiter Theil; Mechan. Behandl. d. Electr.* 3, p. 94. Braunschweig, 1879.

2) G. Wiedemann, *Lehre von der Electr.* 2, p. 12, 1883.

3) H. Poincaré, *Electricité et Optique* 1, p. 41. Paris, 1890.

4) E. Mascart et J. Joubert, *L'électr. et le magnét.* 1, Art. 167. Paris, 1886.

его молекулы. Это отношение (8) было выведено Лорентцом¹⁾ и предложено, как эмпирическая формула, Негреано²⁾.

Если положим, согласно Максвеллу, $K = n^2$ (где n есть показатель преломления для бесконечно длинных волн) и возьмём обратную величину выражения (8), то получим формулы Лорентца³⁾ и Лоренца⁴⁾.

Соотношение (8) может быть только приблизительным, так как предположение о шарообразности молекул не оказывается в действительности достоверным; пока нельзя ещё дать формулам такой вид, который был бы независим от этого предположения и давал более общую связь между диэлектрической постоянной вещества и его плотностью, так как о форме молекул ничего не известно.

Нижеследующая проверка соотношения (8) проведена относительно:

- 1) изменений плотности от давления,
- 2) изменений плотности от теплового расширения,
- 3) изменений плотности от перемены агрегатного состояния,
- 4) связи с результатами теории газов.

Следует здесь особенно заметить, что соотношение (8), как показывают наблюдения, приблизительно годно также и для жидких тел, хотя допущенное при вычислении предположение, что расстояние молекул велико по сравнению с их диаметром, не отвечает здесь действительности.

Указанные плотности d отнесены к воде при 4°Ц. и с помощью известных коэффициентов расширения γ приведены к температуре, при которой наблюдалась диэлектрическая постоянная K . Величины d и γ , поскольку они не указаны у наблюдателей, взяты из таблиц Ландольта и Бернштейна (Tabellen von Landolt und Börnstein, Berlin, 1883).

1) H. Lorentz, Wied. Ann. 9, 642 (1880).

2) Negreano, Compt. rend. 104, 425 (1887); Journ. de phys. (2) 6, 569 (1887); Beibl. 11, 463 (1887).

3) H. Lorentz, цит. выше, стр. 654.

4) L. Lorenz, Wied. Ann. 11, 77 (1889), 20, 19 (1883).

1) *Действие давления.*

Для газов и паров, диэлектрическая постоянная которых мало разнится от единицы, уравнение (8) можно написать в виде:

$$(K - 1) = \frac{3}{D} d, \quad (9)$$

т. е. для газов и паров величина $(K - 1)$ пропорциональна плотности или, при постоянной температуре, давлению¹⁾.

Этот закон был найден Больцманом²⁾ и подтверждён Клеменчицем³⁾.

2) *Тепловое расширение.*

Если постоянная D определена при какой-нибудь плотности тела, то диэлектрическая постоянная K для данной плотности d может быть вычислена из уравнения (8), решённого относительно K ,

$$K = \frac{D + 2d}{D - d}. \quad (10)$$

Таблица II содержит для некоторых жидкостей величины d и K , наблюдаемые при разных температурах: из одной пары величин вычислялось D , и с помощью его потом для других температур вычислялось K .

Согласие наблюдаемых и вычисленных величин оказалось неожиданно хорошо. Большие отклонения у алкоголя могут зависеть от значительных колебаний наблюдаемой величины. Следует обратить ещё особенное внимание на то, что у первых трёх жидкостей значительным изменениям в плотности соответствуют только малые изменения диэлектрической постоянной, тогда как у алкоголя и воды ход изменений совсем иной в согласии с вычислением.

1) Сравни Adler, Wien. Anzeiger. (2) 27, 277 (1890).

2) L. Boltzmann, цит. выше, стр. 807.

3) I. Klemenčič, цит. выше, стр. 736.

Таблица II.

	T	d	D	K выч.	K набл.	
Бензол	17,3°	0,883	2,866	—	2,336	Палац 1)
»	47,3	0,841	—	2,246	2,243	»
Толуол	17,2	0,867	2,772	—	2,365	»
»	47,2	0,838	—	2,300	2,255	»
Вазелиновое масло	17,1	0,880	3,094	—	2,192	Фукс 2)
»	57,9	0,849	—	2,135	2,141	»
Алкоголь	25	0,8009	0,8982	—	25,7	Роза 3)
»	10	0,8129	—	29,6	27,5	»
Вода	25	0,9971	1,0371	—	75,7	»
»	31	0,9954	—	72,6	73,7	»
»	17	0,9988	—	79,2	78,7	»
»	10	0,9997	—	81,2	80,2	»
»	4	1,0000	—	81,8	82,3	»

Относительно зависимости диэлектрической постоянной от температуры имеется ещё исследование Кэсси⁴⁾, но так как большая часть исследованных им веществ была химически неопределённа и так как даны только изменения диэлектрической постоянной, то эти измерения здесь не могут быть использованы. То же самое относится также и к опытам Гопкинсона⁵⁾.

3) Изменения агрегатного состояния.

Для паров мы будем вычислять величину $(K-1)$ по формуле (9), а величину постоянной D заимствуем из данных для жидкого состояния.

В таблице III величины T' , K' , d' и D относятся к жидкому состоянию, а T , d и $(K-1)$ — к парообразному состоянию при 760 мм давления.

1) A. P a l a z, Capac. induct. spec. de quelques diél. Inaugural-dissert. Lausanne 1886; Journ. de Phys. (2) 5, 370 (1885); Beibl. 11, 259 (1887).

2) V. F u c h s, Wien. Ber. (2) 98, 1240 (1889).

3) E. R o s a, Phil. Mag. (5) 31, 188 (1891). Приведённые величины заимствованы из таблиц. Алкоголь, видимо, не был безводен.

4) W. C a s s i e, Phil. Trans. 181, 1 (1890); Proc. Roy. Soc. 46, 357 (1889); Beibl. 14, 132 (1890).

5) H o p k i n s o n, Wied. Electr. 2, 42 (1883).

Таблица III.

	T'	K'	d''	D	T	d	$(K-1)$ выч.	$(K-1)$ набл.	
Вода	14	83,7 ^{§)}	0,999	1,04	170	0,0005	0,0014	(0,001)	Лебедев ¹⁾
Метиловый спирт	»	32,7	0,800	0,88	100	0,0010	34	0,0057	»
Этиловый спирт	»	27,0	0,798	0,89	»	15	51	65	»
Муравьинометиловый эфир	»	9,0	0,980	1,31	»	20	46	69	»
Муравьиноэтиловый эфир	»	9,1	0,916	1,26	»	24	57	83	»
Уксуснометиловый эфир .	»	7,7	0,932	1,35	»	24	53	73	»
Пропионоэтиловый эфир .	»	6,0	0,908	1,45	120	32	66	(0,0140)	»
Этиловый эфир	7	4,76 ⁴⁾	0,740	1,33	100	24	54	0,0045	»
»	—	—	—	—	0	33	74	74	Клеменчич ²⁾
Сероуглерод	7	2,71	1,283	3,53	0	34	29	29	»
Толуол	17	2,36 ⁵⁾	0,867	2,77	126	29	31	43	Лебедев ¹⁾
Бензол	17	2,34	0,883	2,87	100	0,0025	0,0026	0,0027	»

1) См. табл. I.
 2) I. Klemenčić, цит. выше, стр. 754.
 3) S. Tereschin, Wied Ann. 34, 799 (1889).
 4) G. Quincke, Wied. Ann. 19, 725 (1883); Wied. Electr. 4, 1270 (1885).
 5) См. табл. II.

Порядок, в котором идёт возрастание величины $(K - 1)$ от вещества к веществу, один и тот же для наблюдаемых и вычисленных значений; лучшего согласования нельзя и ожидать, так как предположения Клаузиуса для жидкого состояния не отвечают действительности.

Вычисление в согласии с наблюдением показывает, что вещества, у которых в жидком состоянии диэлектрические постоянные очень велики, в газообразном состоянии часто имеют величины $(K - 1)$, которые меньше соответствующих величин тех веществ, кои в жидком состоянии имеют меньшие диэлектрические постоянные.

Весьма большое отклонение у пропионоэтилового эфира может проистекать от неточного измерения величины $(K - 1)$.

4) *Отношение к результатам теории газов.*

Величину заполнения пространства g для газа и пара мы можем определить из их диэлектрических постоянных K , написав с достаточной точностью уравнение (6) в упрощённом виде:

$$g = \frac{K - 1}{3}. \quad (11)$$

С другой стороны, величина g пространственного заполнения получается также из ван-дер-ваальсовского¹⁾ уравнения состояния, где $g = \frac{b}{4}$.

В таблице IV приведены величины пространственного заполнения $g \cdot 10^5$ для 760 мм и 0° Ц.

Весьма достопримечательным результатом является то, что порядок величины пространственного заполнения по обеим теориям тот же самый.

Дальнейшие приложения формулы (6) к молекулярной физике находятся в статьях Дорна²⁾ и Экснера³⁾; также и там согласие результатов с таковыми же, найденными другими путями, вполне удовлетворительно.

1) J. van der Waals, Continuität des flüssigen und gasförmigen Zustandes. Deutsch von Roth. Leipzig, 1881, 136.

2) E. Dorn, Wied. Ann. 13, 378 (1881).

3) F. Exner, Wien. Ber. (2) 91, 850 (1885); Exn. Rep. 21. 446 (1885); Beibl. 9, 714 (1885); Journ. de Phys. (2) 5, 240 (1885).

Таблица IV.

	$g = \frac{b}{4}$	$g = \frac{K-1}{3}$		
	В.-д.-Ваальс	Больцман	Клеменчич	Лебедев
Закись азота	48	33	39	—
Угольная кислота	50	32	33	—
Этилен	56	44	55	—
Хлористый этил	97	—	517	—
Сероуглерод	82	—	97	—
Сернистая кислота	62	—	318	—
Эфир	144	—	248	203
Алкоголь	93	—	—	297
Бензол	128	—	—	123

Результаты произведённой проверки моссотти-клаузиусовской теории диэлектриков могут быть резюмированы следующим образом.

а. Предположение Фарадея, что молекулы суть электропроводящие тела, или предположение Маскара и Жубера, что молекулы обладают чрезвычайно большой диэлектрической постоянной, не приводят ни к какому противоречию с наблюдаемыми явлениями и объясняют последние простым и непринуждённым образом.

б. Соотношением (8) можно с выгодой пользоваться, как эмпирической формулой, связывающей плотность вещества с его диэлектрической постоянной.

Дальнейшее развитие зависимости между пространственным заполнением и диэлектрической постоянной вещества связано со знанием формы молекул и пока ещё не может быть дано.





ОБ ОТТАЛКИВАТЕЛЬНОЙ СИЛЕ ЛУЧЕИСПУСКАЮЩИХ ТЕЛ¹⁾.

Максвелл²⁾ показал, что световой или тепловой луч, падая на поглощающее тело, производит на него механическое давление в направлении падения; величину этой давящей силы P можно выразить в форме

$$P = \frac{E}{V}, \quad (1)$$

где E — энергия, которая падает в единицу времени на поглощающее тело, а V — скорость луча в той среде, в которой находится тело.

Независимо от Максвелла пришли к подобному же результату Бартоли³⁾ и Больцман⁴⁾, рассматривая случай отражения света от зеркала; Бартоли нашёл, что при нормальном падении давление, производимое лучом на зеркало, вдвое больше, чем то, которое тот же луч производил бы на поглощающее тело по Максвеллу.

Попытки Бартоли экспериментально доказать существование этого давления не увенчались успехом, так как ему не удалось освободиться от «радиометрических» явлений.

Цель настоящей статьи заключается в том, чтобы показать, какую долю ньютоновской силы притяжения состав-

¹⁾ Читано автором в физическом коллоквиуме проф. Ф. Кольрауша в Страсбурге 30 (18) июля 1891 года.

²⁾ Maxwell, *Electr. and Magn.* § 792.

³⁾ A. Bartoli, *Exner's Rep.* 21, 198 (1885). См. также у Boltzmann'a.

⁴⁾ L. Boltzmann, *Wied. Ann.* 22, 31 (1884).

ляет отталкивание лучеиспусканием как для солнца, так и для всякого шаровидного тела, температура которого не равна абсолютному нулю. Полученные формулы применимы, однако, только для абсолютно чёрных тел, размеры которых велики сравнительно с длинами волн падающих на них лучей; поэтому для интересных вопросов относительно отталкивания кометных хвостов солнцем, а также и взаимодействия двух соседних молекул в телах, может быть намечен только путь к решению.

Так как только порядок отношения действующих сил представляет интерес, то мы разберём здесь простейший случай, где притягиваемое тело шаровидно и поглощает всю на него падающую энергию, лучеиспускающая её затем равномерно во всех направлениях, и приведём числовые выкладки в первом приближении.

Принимая вместе с Ланглеем количество тепла C , которое доставляет нам в одну минуту пучок солнечных лучей в 1 см^2 поперечного сечения (так называемая «солнечная постоянная»), равным $3 \text{ г} \cdot \text{кал}$, а механический эквивалент тепла $B = 425 \text{ г} \cdot \text{метр}$, мы получаем энергию лучей E , падающую на 1 см^2 в 1 сек.:

$$E = \frac{C}{60} B = \frac{3}{60} \cdot 425 = 21 \text{ г} \cdot \text{метр}.$$

Принимая скорость света $V = 3 \cdot 10^8 \text{ м/сек}$, мы можем вычислить по формуле (1) то давление P_0 , которое производит пучок солнечных лучей с поперечным сечением в 1 см^2 на поглощающее тело, находящееся от солнца на таком расстоянии, как земля:

$$P_0 = \frac{E}{V} = \frac{2}{3} 10^{-7} \text{ г}^1),$$

или в абсолютной мере

$$P_0 = 6 \cdot 10^{-5} \text{ дин.} \quad (2)$$

¹⁾ Давление пучка солнечных лучей в 1 м^2 поперечного сечения равняется $P' = \frac{2}{3} \text{ мг}$.

Если мы примем
 расстояние земли от солнца $\rho = 15 \cdot 10^{12}$ см,
 скорость земли по орбите $\gamma = 3 \cdot 10^6$ см/сек,
 то солнечное ускорение a в расстоянии земли будет

$$a = \frac{\gamma^2}{\rho} = 0,6 \text{ см/сек}^2.$$

Таким образом на расстоянии ρ солнце притягивает 1 г массы с силой A

$$A = 0,6 \text{ дин} \quad (3)$$

Действие, оказываемое солнцем на обращающиеся вокруг него тела, составляется, во-первых, из ньютоновского притяжения; во-вторых, из отталкивательных сил излучения.

Пусть нам дано шаровидное тело, которое поглощает всю на него падающую энергию солнца и лучеиспускает её затем равномерно во все стороны, и пусть это тело находится на расстоянии ρ от солнца. Обозначив его радиус в см через r и плотность через δ , мы можем вычислить силу G , с которой оно притягивается солнцем, и силу H , с которой оно отталкивается им:

$$G = \frac{4}{3} \pi r^3 \delta A,$$

$$H = \pi r^2 P_0.$$

Отсюда легко вычислить ту результирующую силу F , с которой солнце притягивает данное тело, и выразить её в долях ньютоновской силы притяжения:

$$F = \frac{G - H}{G} = 1 - \frac{H}{G} = 1 - \frac{3}{4} \frac{P_0}{Ar\delta}. \quad (4)$$

Для данного тела эта сила F представляет собой характеристическую постоянную, *не зависящую от расстояния от солнца*, так как величины как P_0 , так и A в одинаковой степени зависят от этого расстояния.

Заменяя в уравнении (4) величины P_0 и A их числовыми значениями (2) и (3), мы получаем

$$F = 1 - \frac{10^{-4}}{r\delta}. \quad (5)$$

Отсюда видно, что для всех тел, у которых $\delta > 1$ и $r > 10$ м, отступления от закона Ньютона настолько малы, что не могут быть открыты точнейшими наблюдениями.

Чем меньше мы возьмём радиус r тела, тем более будет выступать отталкивательная сила солнца.

В кометных хвостах, которые, как известно¹⁾, состоят преимущественно из газообразных углеводородов, мы имеем дело с отдельными молекулами, радиус которых $r < 10^{-8}$ см, а плотность $\delta < 10$, как показал Ф. Экснер²⁾; в этом случае, однако, наша формула (5) неприменима во всей строгости, так как отдельные молекулы не суть абсолютно чёрные тела и радиус их мал сравнительно с длиной волны падающего на них света; поэтому мы можем только утверждать, что отталкивание хвостов, во много раз превышающее притяжение их, притом различное для различных веществ хвоста и обратно пропорциональное квадрату расстояния от солнца, не противоречит нашей формуле. Из наблюдений кривизны сорока кометных хвостов Ф. А. Бредихин³⁾ нашёл три величины этой отталкивательной силы: 17; 1,1 и 0,2; эти величины могут быть без натяжки объяснены вышеуказанным механическим действием солнечных лучей, чем устраняется гипотеза электростатического заряда солнца, разработанная Цельнером⁴⁾; нужно заметить, что уже Фей⁵⁾ выразил предположение, что отталкивательную силу солнца надо искать в его лучеиспускании, не наметив, однако, пути к решению вопроса.

Только что разобранный вопрос об отталкивательной силе солнца можно решить и для более общего случая, где вместо солнца мы имеем тело, радиус которого R , плотность Δ , а количество тепла, лучеиспускаемое 1 см^2 его поверхности в 1 сек., равно Q . К этому общему случаю мы можем перейти, исходя из добытых результатов для солнца и имея в виду, что радиус солнца $R_0 = 7 \cdot 10^{10}$ см;

1) См. Scheiner, Spectralanalyse der Gestirne 3, Cap. 3. Leipzig, 1890.

2) F. Exner, Sitzungsber. der Wien. Akad. 91, II, 850 (1885). Exner's Rep. d. Phys. 21, 446 (1885). Wied. Beibl. 9, 714 (1885). Journ. de Phys. [2] 5, 240 (1885).

3) Th. Bredichin, Révision des valeurs numériques de la force répulsive. En comission chez Voss. Leipzig, 1885.

4) Zöllner, Über die Natur der Kometen. Leipzig, 1872.

5) Faye, Compt. Rend. 93, 11, 362 (1881).

плотность его $\Delta_0 = 1,4$; лучеиспускание 1 см^2 его поверхности в 1 сек. $Q_0 = 2000 \text{ г} \cdot \text{кал}^1$).

Обозначив через S отношение отталкивательной силы лучеиспускания тела к его ньютоновской силе притяжения, мы можем утверждать, что S прямо пропорционально Q , обратно пропорционально Δ и также обратно пропорционально R^2). Для солнца эта величина S_0 из формулы (5)

$$S_0 = \frac{10^{-4}}{r\delta}.$$

Для всякого другого тела мы имеем

$$S = S_0 \frac{Q}{Q_0} \cdot \frac{\Delta_0}{\Delta} \cdot \frac{R_0}{R} \quad (6)$$

или, заменяя S_0 , Q_0 , Δ_0 и R_0 вышеприведёнными величинами, имеем

$$S = \frac{10^{-4}}{r\delta} \cdot \frac{Q}{2000} \cdot \frac{1,4}{\Delta} \cdot \frac{7 \cdot 10^{10}}{R} = 5 \frac{Q}{r\delta R \Delta} 10^3. \quad (7)$$

Равнодействующая притягательной и отталкивательной силы этого тела K

$$K = 1 - S = 1 - 5 \frac{Q}{r\delta R \Delta} 10^3. \quad (8)$$

Для чёрного тела, находящегося при 0°С , Христиансен³⁾ нашёл, что 1 см^2 его поверхности лучеиспускает в 1 сек. количество Q' :

$$Q' = 1,21 \cdot 10^{-12} \cdot 273^4 = 0,0037 \text{ г} \cdot \text{кал}.$$

Таким образом сила K' , с которой шаровидное абсолютно чёрное тело, находящееся при 0°С и имеющее радиус $R \text{ см}$

1) Если мы примем, что на расстоянии земли от солнца, $\rho = 15 \cdot 10^{12} \text{ см}$, на 1 см^2 падают в 1 мин. $3 \text{ г} \cdot \text{кал}$, или в 1 сек. $0,05 \text{ г} \cdot \text{кал}$, то 1 см^2 на поверхности солнца, в расстоянии $R_0 = 7 \cdot 10^{10} \text{ см}$ от центра, лучеиспускает $Q_0 = 0,05 \left(\frac{\rho}{R_0}\right)^2 = 2000 \text{ г} \cdot \text{кал}$ в 1 сек.

2) Так как притягательная сила массы пропорциональна R^3 , а отталкивательная сила лучеиспускания пропорциональна R^2 .

3) Christian sen, Wied. Ann. 19, 279 (1883).

и плотность Δ , будет притягивать в мировом пространстве шаровидное абсолютно чёрное тело, радиус которого r см, а плотность δ , будет приблизительно равна

$$K' = 1 - \frac{20}{r\delta R\Delta}. \quad (9)$$

Отсюда следует, что два шаровидных тела, температура которых около 0°C , плотности которых $\Delta = \delta = 10$ и радиусы $R = r = 4$ мм, в мировом пространстве не притягивают и не отталкивают друг друга. Переходя затем к телам, радиус которых ещё меньше, мы видим, что у них сила отталкивания значительно превышает силу ньютоновского притяжения: так, пылинки, радиус которых не превышает одной тысячной миллиметра, будут отталкиваться при 0°C в мировом пространстве с силой, порядок которой в миллион раз превышает порядок силы их ньютоновского притяжения.

Принимая радиус тела всё меньше и меньше, мы можем таким образом перейти к молекулярным размерам. Для молекул, однако, наша формула (8) неприменима, так как молекулы не суть абсолютно чёрные тела, и как размеры их, так и их взаимные расстояния в телах малы сравнительно с длинами лучеиспускаемых волн: взаимодействие молекул можно рассматривать как более сложный случай, как действие резонаторов друг на друга.

Если формула (8) и не даёт нам величины лучистого взаимодействия молекул, то она обращает наше внимание на то обстоятельство, что при изучении сущности так называемых «молекулярных сил» мы не можем пренебрегать силами, возникающими от лучеиспускания, не определив предварительно той доли молекулярных сил, которую они составляют, и не отделив эти известные силы от неизвестных.





О ДВОЙНОМ ПРЕЛОМЛЕНИИ ЛУЧЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИЛЫ.

После того как Герц дал нам методы экспериментально проверить следствия электромагнитной теории света и тем открыл для исследования неизмеримую область, естественно появилась потребность делать его опыты в небольшом масштабе, более удобном для научных изысканий. Первые попытки в этом направлении сделал О. Лодж¹⁾, а затем в последнее время А. Риги²⁾ выработал удобный метод, которым теперь многократно пользуются.

Мне удалось при дальнейшем уменьшении аппаратов получить и наблюдать электрические волны, длина которых не превосходила долей одного сантиметра ($\lambda = 0,6$ см) и которые были ближе к более длинным волнам теплового спектра, чем к электрическим волнам, которыми вначале пользовался Герц; при этих волнах можно пользоваться такими маленькими параболическими зеркалами, что призма для доказательства явления преломления может быть лишь немногим более одного сантиметра. Таким образом явилась возможность распространить основные опыты Герца на кристаллические среды и пополнить их исследованием двойного преломления в кристаллах.

¹⁾ O. Lodge, Nature 41, 462 (1890).

²⁾ A. Righi, Memorie d. Acc. d. Bologna (5) 4, 487 (1894).

Ещё надобно заметить, что явление двойного преломления электрических волн большей длины в дереве уже получено А. Риги¹⁾; оно обнаружилось в явлении эллиптической поляризации и её зависимости от толщины слоя²⁾.

І. Приборы.

Общее расположение опыта было сделано по образцу классического расположения Гертца: в фокусе цилиндрического зеркала возбуждалось электрическое колебание, а в фокусе вторичного зеркала находились два прямолинейных резонатора, помощью которых и обнаруживался пучок электрических лучей; разница заключалась лишь в том, что линейные размеры приборов были в сто раз меньше. Такое уменьшение размеров приборов оказалось, однако, невозможным без некоторых изменений: так, первичному проводнику была дана форма, предложенная Риги, а возбуждение резонатора было обнаруживаемо не при помощи вторичной искры, как у Гертца, а термоэлектрическим способом Клеменчича³⁾.

Первичный проводник (рис. 4) состоял из двух платиновых цилиндров P_1 и P_2 (каждый по 1,3 мм длины и

1) Там же, стр. 565.

2) Помещая между скрещенными зеркалами пластинки дерева (M a s k, Wied. Ann. 54, 342 (1895)) или льда (V. Biernacki, Wied. Ann. 55, 602 (1895)) так, чтобы волокна дерева или оси ледяных кристаллов составляли угол в 45° с осями зеркал, и наблюдая возбуждение резонатора во вторичном зеркале, ещё нельзя заключить, что данное вещество двупреломляющее, т. е. что скорости двух составляющих луча различны. подобное явление может быть вызвано также и различной в различных направлениях проводимостью данной пластины, как это Гертц показал для своей поляризационной решётки. Что описанное явление в дереве действительно обуславливается такой особенностью проводимости, показали исследования Риги (цит. выше); может быть, что абсолютная величина проводимости речного льда в разных направлениях окажется ничтожной, и тогда для льда такой метод явится применимым; во всяком случае наблюдения при различных толщинах пластин, как то сделал Риги, и в этом случае будут необходимым контролем.

3) I. K l e m e n č i č, Wied. Ann. 42, 416 (1891); 50, 175 (1893).

0,5 мм в диаметре), которые были впаяны в стеклянные трубки G_1 и G_2 ; заряды подводились искрами, которые перескакивали с проволок D_1 и D_2 на платиновые цилиндры.

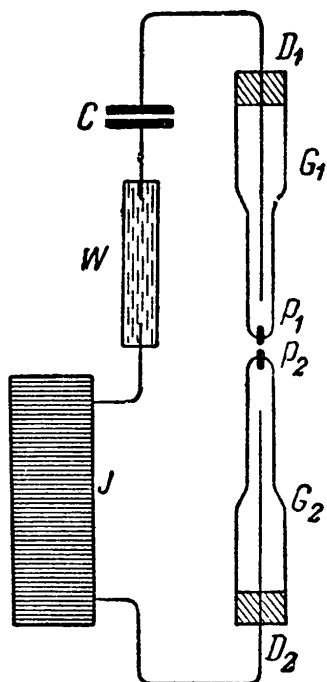


Рис. 4.

Первичный проводник находился в фокусе кругового цилиндрического зеркала (высота 20 мм, отверстие 12 мм, фокусное расстояние 6 мм)¹⁾; для того чтобы искра первичного проводника перескакивала в жидком изоляторе, всё зеркало было погружено в керосиновую ванну, из которой пучок электрических лучей выходил в воздух через слюдяное окошко; длину первичной искры ($l = 0,02$ мм) можно было регулировать помощью винта. В цепь небольшого индуктория (который давал 30 прерываний в секунду) был введён конденсатор C для того, чтобы избежать вредного для первичной искры разряда всего индуктория, и водяное сопротивление W .

Помощью второго параболического зеркала, которое было точной копией вторичного зеркала Герца (высота 20 мм, отверстие 12 мм, фокусное расстояние 1,4 мм) лучи концентрировались на два прямоугольных резонатора, из которых каждый имел длину в 3 мм. На обращённых друг к другу концах резонаторов R_1 и R_2 (рис. 5) были припаяны петельки из очень тонкой проволоки ($d = 0,01$ мм), с одной стороны железной, с другой — константовой; петельки эти проходили друг в друга. Посредине каждого резонатора (т. е. в узле его электрического колебания) была при-

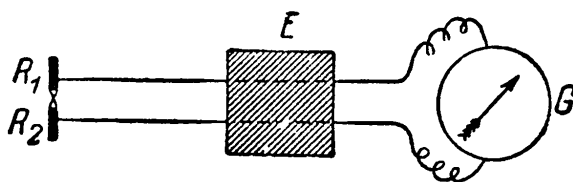


Рис. 5.

¹⁾ Я пользовался круговым цилиндром вместо параболического, как у Герца, в видах более лёгкого изготовления.

паяна упругая проволока¹⁾, укрепленная в эбонитовой пластинке *E*.

Когда резонаторы возбуждаются, то они частью разряжаются при каждом колебании через проволоки термоэлемента, нагревание которых измеряется первым отклонением очень чувствительного гальванометра. Вторичное зеркало было помещено в коробочку со слюдяным окошком, через которое свободно проникали лучи электрических колебаний.

Оба зеркала были помещены на спектрометре. Первичное зеркало было неизменно помещено на место коллиматора, и ось его постоянно оставалась вертикальною; вторичное зеркало, помещенное на место трубы, могло перемещаться по кругу, а также вращаться вокруг горизонтальной оси наподобие николя. Расстояние между зеркалами в большинстве случаев было 10 см, что соответствует 10 метрам у Герца.

II. Основные опыты Герца.

Описанные аппараты позволяют без труда повторить основные опыты Герца.

а) Поляризация.

Для опытов с поляризацией я пользовался четырёхугольной решёткой (в 2×2 см), которая состояла из 20 тонких проволочек; опыты с параллельными и скрещенными осями зеркал были тождественны с таковыми же опытами Герца.

Подобная (несколько большая) решётка находилась на пути луча при всех нижеописанных опытах; вращая её вокруг луча, мы не изменяем те случайные внешние силы, которые непосредственно действуют на стрелку гальванометра (напр., магнитное действие индуктория и т. д.), и потому разница отклонений при двух главных положениях решётки исключительно обусловлена лучами электрической силы.

¹⁾ Эти проволоки, пружинясь, натягивали петельки термоэлемента и обуславливали их надёжный металлический контакт.

б) Интерференция.

Пользуясь двумя плоскими зеркалами, нетрудно измерить по методу Больцмана¹⁾ длину волны луча: за максимумом, который наблюдается при разнице ходов в 0 см, следует ясно выраженный минимум при 0,2—0,3 см, за которым следует слабый максимум при 0,5—0,6 см; при больших разницах ходов периодических изменений более не наблюдается, что указывает на значительное затухание электрических колебаний. По данным этого наблюдения находим длину волны $\lambda = 0,6$ см, что вполне соответствует геометрическим размерам приборов.

в) Прямолинейное распространение.

При расстоянии в 10 см между зеркалами легко исследовать прозрачность изоляторов (эбонит, слюда, стекло) и непрозрачность проводников (металлических пластин).

При удалении вторичного зеркала от первичного уменьшаются отклонения гальванометра, притом несколько более, чем прямо пропорционально расстоянию.

Резкого геометрического очертания луч не имеет; тем не менее направление луча можно легко определить с точностью до трёх градусов.

г) Отражение.

Для опыта с отражением достаточно иметь металлическое плоское зеркало в 2×2 см. Для того чтобы показать особенности анизотропных поверхностей, можно воспользоваться описанной поляризационной решёткой.

д) Преломление.

Для того чтобы показать явление преломления, можно воспользоваться маленькой эбонитовой призмой (высота 1,8 см, ширина 1,2 см, преломляющий угол 45 градусов), которая весит менее 2 г (тогда как у Герца вес призмы был 600 кг).

¹⁾ L. Boltzmann, Wied. Ann. 40, 399 (1890).

Призма была поставлена на столик спектрометра, первичное зеркало находилось от неё в 3 см, тогда как расстояние до вторичного было 7 см; наблюдения производились, как обыкновенно, для двух положений наименьшего отклонения. Для определения направления отклонённого луча вторичное зеркало передвигалось по лимбу, и наблюдалось максимальное отклонение гальванометра. Металлическая диафрагма (шириной в 1,2 см), помещённая непосредственно перед призмой, не имела влияния на положение максимума, хотя самый максимум был в этом случае менее резко выражен; ввиду последнего обстоятельства измерения отклонений производились без диафрагмы.

Угол отклонения оказался в 30° , откуда следует, что показатель преломления *эбонита* $n = 1,6$.

Квадратные корни из диэлектрических постоянных, найденных различными наблюдателями¹⁾, для *эбонита* колеблются между 1,4 и 1,8. Если мы, следуя Гертцу, и не будем приписывать абсолютной величине показателя преломления, найденного при помощи таких малых призм, особого значения, мы вправе тем не менее утверждать, что в пределах погрешностей наблюдения закон Максвелла имеет место.

III. Двойное преломление.

Размеры описанных аппаратов позволили распространить основные оптические опыты и на кристаллические среды. Из различных кристаллов наиболее удобным для таких опытов оказалась *естественная ромбическая сера* не только благодаря своим превосходным качествам изолятора, но и благодаря значительной разнице показателей преломления для обоих лучей. Так как её диэлектрические постоянные в различных направлениях были определены Больцманом²⁾, то в последующем ориентировка материала дана по отношению к большей (D_g), средней (D_m) и меньшей (D_k) диэлектрическим осям.

1) См. таблицы Landolt'a. 2-е издание, стр. 196, 1894 г.

2) L. Boltzmann, Wien. Ber. (II) 70, 342 (1874).

а) *Призматическое отклонение.*

Из двух хороших кристаллов были вырезаны две совершенно равные призмы (высота 1,8 см, ширина 1,3 см и преломляющий угол в 25 градусов); преломляющее ребро первой было параллельно большой (D_g) оси, а второй — параллельно малой (D_k). Углы отклонения для электрических колебаний, параллельных преломляющему ребру, были определены тем же способом, как и для эбонитовой призмы; из этих измерений следует для серы

$$\begin{aligned} n_g &= 2,2_5, \\ n_k &= 2,0_0. \end{aligned}$$

Если по абсолютным величинам эти показатели, как указано выше, и отступают от истинных, то тем не менее разница их при данных условиях опыта исключительно обуславливается разной ориентировкой кристаллических осей.

Квадратные корни из диэлектрических постоянных, найденных Больцманом, суть

$$\sqrt{D_g} = \sqrt{4,77} = 2,18.$$

$$\sqrt{D_k} = \sqrt{3,81} = 1,95.$$

Эти опыты дают нам право утверждать, что электрические волны претерпевают в кристаллической сере двойное преломление и что для этой среды закон Максвелла имеет место.

К сожалению, я не располагал необходимым материалом для определения показателя преломления n_m .

б) *Призма Николя.*

Найденные показатели преломления позволяют определить угол полного внутреннего отражения на границе эбонита для «среднего» показателя преломления серы и, пользуясь им, построить николю для электрических лучей. Этот николю был выполнен следующим образом: параллелепипед ($2 \times 1,8 \times 1,2$ см) из кристаллической серы,

диэлектрические оси которого были параллельны рёбрам, был распилен по диагонали параллельно D_g и под углом в 50° к D_k ; между полученными двумя частями была вставлена плоская эбонитовая пластинка (толщина 1,8 мм): пучок лучей, идущий в направлении D_m , разлагается на две составляющие, из которых первая, параллельная D_g , претерпевает полное внутреннее отражение у эбонитовой пластинки и отклоняется в сторону, тогда как другая составляющая, параллельная D_k , беспрепятственно проходит.

С этим никодем без всякого затруднения можно повторить известные оптические опыты.

Когда зеркала поставлены так, что оси их параллельны, то «поле темно»¹⁾, покуда D_g параллельно осям зеркал (передвигая вторичное зеркало, можно убедиться, что в этом случае пучок отклонён); если повернуть теперь наш никодем вокруг луча на 90° градусов, то луч проходит, и гальванометр тотчас даёт отклонение.

Если оси зеркал скрещены, то гальванометр остаётся в покое, покуда никодем занимает одно из главных положений, но достаточно повернуть никодем на 45° , чтобы «поле осветилось» и гальванометр тотчас же дал отклонение.

в) Пластинка в четверть волны.

Опыты с пластинкой $\frac{\lambda}{4}$, которые составляют основание всех интерференционных явлений кристаллической оптики, легко воспроизвести следующим образом: из куска кристаллической серы вырезается квадратная (2×2 см) пластинка толщиной в 0,6 см так, чтобы оси D_g и D_k лежали в её плоскости; для волн $\lambda = 0,6$ см разница фаз в такой пластинке равна $\frac{\pi}{2}$.

Если такую пластинку поместить между скрещенными зеркалами, то наблюдается следующее: покуда обе диэлектрические оси параллельны осям зеркал, гальванометр

¹⁾ Затемнение в этом случае неполное — около $\frac{1}{5}$ доли всей энергии проходит через никодем, что вполне объясняется диффракцией.

остаётся в покое — поле темно; но стоит только повернуть пластинку вокруг луча на 45° , чтобы получился циркулярно-поляризованный луч и гальванометр тотчас дал отклонение.

Если в циркулярно-поляризованный луч ввести другую пластинку, притом так, чтобы одноимённые оси пластинок были перпендикулярны, то гальванометр остаётся в покое — поле опять темно.

Опыты с более толстыми кристаллическими пластинками не дают явлений, аналогичных с известными оптическими явлениями; это объясняется тем обстоятельством, что употребляемые нами электрические волны, как указано выше, слишком быстро затухают.

Если число описанных опытов и невелико, то тем не менее они достаточны, чтобы иллюстрировать взгляды Максвелла на распространение электрических колебаний в кристаллических средах, высказанные им ещё в 1862 г., а также ещё раз показать тождество в явлениях электрических и световых колебаний и в этом более сложном случае.

ДОПОЛНЕНИЯ.

При описании вышеуказанных опытов я предполагал возможным обойти некоторые подробности, которые не касаются основы этих исследований. Так как, однако, при повторении и дальнейшем углублении этих исследований подробности могут быть желательны, я позволяю себе описать их здесь более детально.

I. Первичный проводник.

Из различных систем для первичного проводника наиболее подходящей оказалась система Риги. Подводки из плохо проводящих тел и разбавленных электролитов на месте воздушных искр Риги не ухудшали действия первичного проводника, но были неудобны по техническим соображениям.

Поддерживающей оправой для первичного проводника служила рама $RRRR$ (рис. 6), которая была сделана из

стеклянной трубки. К этой трубке приклеивались шеллаком обе половины G_1 и G_2 держателя, вставлявшиеся в цинковые оправы.

Подвинчивая винт V , можно было деформировать раму и таким образом регулировать длину первичной искры ($l = 0,02$ мм) с достаточной точностью; при этом наиболее деятельная первичная искра имела вид слабой звёздочки.

Следует ещё заметить, что обе половины первичного проводника должны быть вмазаны очень прочно, так как при образовании первичной искры керосин моментально испаряется и стремится с большой силой раздвинуть обе половины первичного проводника и изменить наивыгоднейшую длину искрового промежутка.

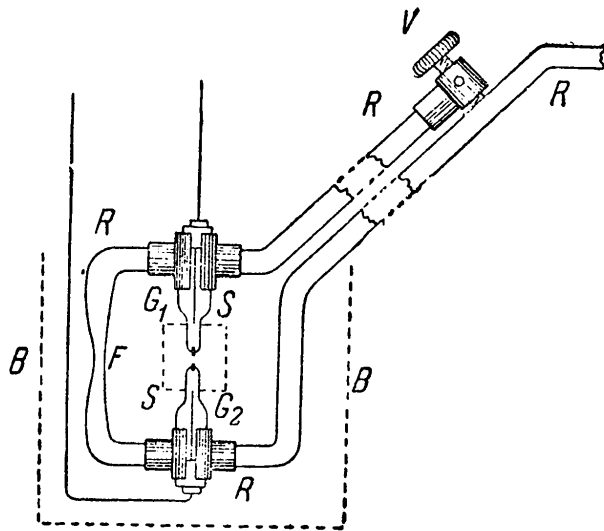


Рис. 6.

К той же самой раме $RRRR$ было прикреплено и первичное зеркало SS ; чтобы уставить первичный проводник точно в фокальной линии зеркала, служил шаблон (рис. 7).

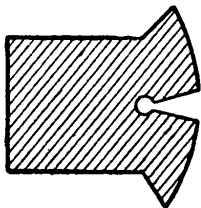


Рис. 7.

Первичный проводник был помещён несколько ближе к зеркалу, чем на половину его радиуса кривизны, чтобы исправить ход краевых лучей.

Затем рама была погружена в керосиновую ванну BB (рис. 6). Это расположение имеет ещё существенные преимущества в том отношении, что для заданного периода длина волны в керосине меньше, чем в воздухе, и потому при заданных размерах зеркала диффракционные явления будут значительно слабее.

Первичные проводники должны быть часто возобновляемы, так как, по причине распыления платины, они приблизительно через 100 замыканий становятся негодными.

Во всем исследовании наибольшего попечения и внимания требует первичный проводник, так как его возбуждение очень сложным, не поддающимся описанию образом зависит от того, как подводится к нему электричество.

Из всех расположений, которые я имел возможность испытать, оказалось на деле наилучшим описанное выше (рис. 4, стр. 68). Размеры конденсатора C и водяного сопротивления W зависят от применяемого индуктория (и от регулировки его прерывателя), наивыгоднейшие размеры находятся при одновременном изменении обоих аппаратов. Для индуктория, которым я пользовался и который был снабжён прерывателем Дебре и от восьми аккумуляторов давал максимальную искру в 12 см, было вполне достаточно одной лейденской банки, сделанной из стеклянной трубки ($d=1$ см) и имевшей обкладки из цинка всего лишь в 5 см высоты. Сопротивлением служила водяная колонна 5 мм в диаметре и 20 см длины.

Из предварительных исследований, которые я производил с различными первичными проводниками, выяснилось, что наивыгоднейшая длина первичной искры в грубом приближении пропорциональна длине волны. При разрядных явлениях подобного рода нет возможности указать количественную зависимость между длиной искрового промежутка и размерами проводников, с одной стороны, и излучаемой энергией — с другой стороны. Можно было бы приблизительно оценить эту зависимость так: при удвоении длины волны излучаемая энергия увеличивается в 10 раз (благодаря чему исследования тотчас же становятся гораздо легче). Дальнейшему уменьшению длины волны препятствуют большие трудности. Наименьшие аппараты, с которыми я мог ещё получать заметные действия, соответствовали длине волны в 3 мм. Ничтожное количество излучаемой энергии и технические трудности при изготовлении аппаратов удержали меня от дальнейшего уменьшения длины волны.

Если применить для данного резонатора больший первичный проводник, как это указал Риги¹⁾, то возбуждение резонатора увеличивается. Так как, однако, основное коле-

¹⁾ A. Righi, Memorie d. R. Accad. di Bologna (5) 4, 500 (1894).

бание здесь более медленное, то все диффракционные явления при описанных размерах зеркала настолько усиливаются, что пучок параллельных лучей становится очень размытым.

2. Резонаторы.

При выборе метода наблюдения я сравнил методы болометрический и термоэлектрический и нашёл последний метод более чувствительным. Это объясняется тем, что при уменьшении размеров чувствительность болометра уменьшается, между тем как чувствительность термоэлемента остаётся постоянной.

Резонаторы вместе с подводящими проволоками могут быть сделаны проще всего, если, согнув соответствующим образом конец проволоки (как в увеличенном масштабе показывает рис. 8), мы заполним проволочную петлю мягким припоем¹⁾.

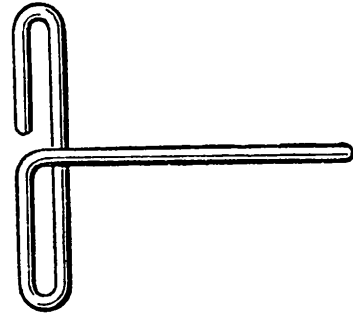


Рис. 8.

Изготовление термоэлементов из очень тонких проволок ($d = 0,01$ мм при бл.) кажется на первый взгляд гораздо более трудным, чем это оказалось после некоторого упражнения. Покупные проволоки из *константана* и *железа* ($D = 0,025$ мм)²⁾ осторожно стравливались в слегка нагретой и разбавленной царской водке, и их диаметр измерялся при помощи микроскопа с окулярным микрометром, увеличивавшего в 20 раз.

Резонаторы, смонтированные предварительно на эбонитовой пластинке, зажимались вместе в струбцинку, и на них накладывались перевитые друг с другом проволоки³⁾ термо-

¹⁾ Толщина резонатора должна быть меньше, чем треть его длины.

²⁾ Выписаны от Hartmann u. Braun в Боккенгейме около Франкфурта на М.

³⁾ Концы проволок каждой петли термоэлемента должны быть по возможности близки друг к другу, чтобы промежуток между ними был возможно мал по сравнению с толщиной резонаторов. Иначе обнаруживается сильное влияние на собственный период колебания резонаторов. Рис. 5 (стр. 68) должен быть поэтому рассматриваем лишь как схема.

элемента и припаивались при помощи паяльной жидкости и мягкого припоя. Так как паяльник должен быть очень мал, то необходимо его всё время прогревать при помощи маленького связанного непосредственно с ним газового пламени. При малых размерах не очень легко придать сразу нужные размеры термоэлементу, и поэтому можно рекомендовать сделать несколько пар резонаторов, чтобы иметь возможность выбрать наилучшую.

После того как бывает смыта паяльная жидкость, оказывается обыкновенно, что термоэлемент не проводит гальванического тока. Если мы включим такой термоэлемент между полюсами вторичной катушки индуктория, то достаточно замкнуть первичный ток на одно мгновение, чтобы получить в термоэлементе прочный металлический контакт. Гальваническое сопротивление такого термоэлемента лежало между 0,5 и 2,0 омами.

Чтобы увеличить чувствительность термоэлементов, я с успехом пробовал впаивать резонаторы в стеклянные шары, из которых затем по возможности выкачивался воздух при помощи ртутного насоса Шпренгеля, после чего они запаивались. Таким образом значительно понижалась скорость охлаждения термоэлементов и соответствующим образом увеличивалась их чувствительность. Резонаторы впаивались таким образом, что они находились в фокусе шаровой поверхности стеклянного шара, посеребрённого с его внешней поверхности. Хотя этот метод представляет значительные экспериментальные преимущества, я всё-таки счёл нужным провести работу с резонаторами, помещёнными в воздухе, чтобы оставаться возможно ближе к расположению Гертца.

3. Гальванометр.

Неизбежные колебания температуры термоэлемента и более равномерное функционирование первичного проводника при кратковременных замыканиях требовали применения гальванометра с малым периодом ($\tau/2 = 3$ сек.). Чрезвычайно удобным оказался гальванометр Дю-Буа—Рубенса с исключительно лёгкой системой стрелок (длина магнитов =

≈ 3 мм). Внешние магнитные возмущения были ослаблены приблизительно в 5 раз при помощи цилиндра из железной жести (толщина стенки \approx пригл. 2 см), который был надет на гальванометр вместо стеклянной защиты.

4. Вредные влияния.

Если поляризационная решётка поставлена так, что электрические колебания не могут достигнуть резонаторов, то всё-таки целый ряд вредных побочных причин может вызывать отклонение гальванометра. Полезно по возможности уменьшить (до 1 — 2 делений) эти отклонения.

а) *Магнитные силы*, которые зависят от индуктория и подводящих проволок, можно сделать безвредными, придав соответствующее положение индукторию и обвив друг около друга подводящие провода.

б) *Электростатические силы*, зависящие от подводок к первичному проводнику, могут наводить в цепи термоэлемента периодические заряды, которые, выравниваясь через термоэлемент, могут вызывать отклонения гальванометра. Эти отклонения можно значительно уменьшить, перевивая проволоки цепи термоэлемента и защищая вторичное зеркало металлическим чехлом, отведённым к земле.

в) *Электрические колебания* большой длины волны, в случае, если таковые возникают в подводках к первичному проводнику (например вследствие побочных искр) и начинают влиять индуктивно на цепь термоэлемента, вызывают при некоторых обстоятельствах громадные отклонения гальванометра.

г) *Тепловое излучение* первичного проводника, которое отражается и преломляется по тем же законам, что и электрические колебания, настолько незначительно, что не вызывает заметного нагревания термоэлемента.

5. Наблюдения.

Медленные изменения нулевой точки гальванометра, обусловленные колебаниями комнатной температуры, не оказывают вреда, так как при коротком периоде колебаний

($\tau/2 = 3$ сек.) отклонение гальванометра может быть легко определено с точностью до одного деления.

Значительно большая неточность обусловливается непостоянством первичной искры¹⁾. Эта неточность может быть ослаблена соответствующим порядком наблюдений, причём отдельные измерения сравниваются с одним определённым измерением: таким образом можно без труда редуцировать все наблюдения на некоторое постоянное возбуждение первичной искры; как пример может служить одно определение положения отклонённого луча для призмы из серы (P_g).

В таблице I даны наблюдаемые отклонения гальванометра в делениях (собственно разности отклонений при двух положениях решётки). Под φ^0 подразумеваются положения вторичного зеркала на круге спектрометра. Стрелками обозначен порядок наблюдений. Первичная искра регулировалась во время наблюдений четыре раза.

Т а б л и ц а I.

φ^0	I регулировка	II регулировка	III регулировка	IV регулировка
140°	13	14 6		13
145	↓	↓	↗ 22 ↘ 8	↗ ↓ 10 7
150	↗ 20 ↓ 13 ↘ 7	↗ 14 ↓ 22 ↘ 12 8	↗ 21 ↓ 18 ↘ 9 7 5	↗ 22 ↓ 15 ↘ 11 7
155	↓ ↗ 3	↓ ↗ 5	8 ↗ 3 ↘	
160				

Если мы сделаем предположение, что первичная искра изменяется равномерно, то можно наблюдаемые отклонения обычным образом редуцировать на постоянное возбуждение первичной искры (20 делений при $\varphi^0 = 150^\circ$).

Таблица II даёт редуцированные отклонения.

¹⁾ Главным образом это непостоянство обусловливается, по-видимому, недостаточно прочным соединением обеих половин первичного проводника с рамой, что и даёт о себе знать весьма быстрым увеличением первичной искры.

Таблица II.

φ^0	I регулировка	II регулировка	III регулировка	IV регулировка	Среднее значение
140°	16	15 12		14	14
145			21 20	16 15	18
150					20
155	6		11 10		10
160		6			6

Таким же точно образом наблюдалось и другое положение наименьшего отклонения призмы.

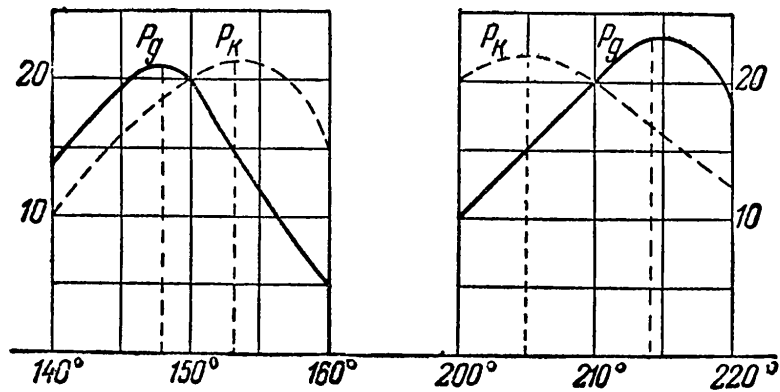


Рис. 9.

В таблице III сопоставлены средние значения двух¹⁾ рядов наблюдений для обеих призм (P_g) и (P_k); результаты графически изображены на рис. 9.

Таблица III.

φ_1^0	P_g	P_k
140°	14	6
145	18	17
150	20	20
155	10	21
160	6	15

φ_2^0	P_g	P_k
200°	10	20
205	14	22
210	20	20
215	23	17
228	18	13

¹⁾ Второй ряд был получен с новым первичным проводником.

Из рис. 9 получаются следующие значения для максимальных отклонений:

$$\begin{aligned} P_g & 148^\circ \text{ и } 214^\circ \\ P_k & 153^\circ \text{ и } 205^\circ. \end{aligned}$$

Отсюда для показателей преломления ($\alpha = 25^\circ$) вычисляются величины:

$$\begin{aligned} n_g &= 2,26 \\ n_k &= 2,00. \end{aligned}$$

Все остальные наблюдения были выполнены и редуцированы тем же самым способом.

Препараты из серы.

Натуральная кристаллическая сера¹⁾ требует при своей обработке соблюдения некоторых мер предосторожности, так как она не выдерживает без растрескивания даже самых ничтожных местных нагреваний, какие вызываются распиливанием или даже при прикосновении к ней руками.

Если весь кристалл может быть предназначен для выделки только одного препарата, то работа легко, быстро и точно осуществляется, сошлифовывая кристалл на куске натянутой наждачной бумаги. Если же необходимо из одного и того же кристалла приготовить два препарата, то полезно в данном направлении наметить два разреза, отстоящих друг от друга приблизительно на 2 мм, и не слишком тонким лобзиком попеременно с осторожностью пилить то по одному, то по другому разрезу: хотя кристалл и трескается под пилой, но эти трещины всегда проникают в сравнительно слабый промежуточный слой. Дальнейшая обработка происходит шлифованием.

При постоянном контроле с помощью гониометра углы легко могут быть получены с точностью до 1° .

¹⁾ Кристаллы были выписаны от J. Böhm'a (торговля минералами) из Вены.

В заключение можно ещё указать, что короткие волны пригодны для обширных применений, так как здесь с приборами средних размеров, безукоризненными в оптическом отношении, диффракционные явления могут быть вполне отодвинуты на задний план, и незначительные количества исследуемых веществ уже достаточны для точных измерений. Таким образом те простые условия, к которым мы привыкли при оптических исследованиях, могут быть осуществлены и в оптике гертцовских колебаний.

Москва. Физическая лаборатория Университета.
Апрель, 1895.





ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОНДЕРО- МОТОРНОГО ДЕЙСТВИЯ ВОЛН НА РЕЗОНАТОРЫ.

ВВЕДЕНИЕ.

Гениальные работы Герца открыли исследованию необозримую область явлений, указав приёмы получать и наблюдать электромагнитные волны разной длины. Герц показал, что эти волны по своей физической природе тождественны с волнами видимого света: всё учение о свете (о лучистой энергии) является нам теперь не независимым отделом физики, а представляет собой лишь главу в учении об электрических колебаниях. Обширная литература последних десяти лет свидетельствует нам, как разнообразно были исследованы явления электрических колебаний, причём одни исследователи (Риги, Garbasso, Лодж и др.) занялись изучением *распространения* этих колебаний в среде и, пользуясь достаточно короткими волнами, проследили и установили тождество между электромагнитными и оптическими явлениями в самых разнообразных случаях, тогда как другие исследователи (Кон, Друде, Бьеркнес, Биркеланд и др.) обратились к исследованию электромагнитных *свойств и особенностей среды*, в которой распространяются эти колебания.

В исследовании Герца, в интерпретации световых колебаний как электромагнитных процессов, скрыта ещё и другая, до сих пор не затронутая задача — задача об *источниках лучеиспускания*, о тех процессах, которые совершаются в молекулярном вибраторе в то время, когда он

отдаёт световую энергию в окружающее пространство; такая задача ведёт нас с одной стороны в область *спектрального анализа*, а с другой как бы совершенно неожиданно приводит к одному из наиболее сложных вопросов современной физики, к учению о *молекулярных силах*. Последнее обстоятельство вытекает из следующих соображений: становясь на точку зрения электромагнитной теории света, мы *должны утверждать*, что между двумя лучеиспускающими молекулами, как между двумя вибраторами, в которых возбуждены электромагнитные колебания, *существуют пондеромоторные силы*: они обусловлены электродинамическими взаимодействиями переменных электрических токов в молекулах (по законам Ампера) или переменных зарядов в них (по законам Кулона), — мы, следовательно, должны утверждать, что между молекулами в этом случае существуют *молекулярные силы*, причина которых неразрывно связана с процессами лучеиспускания.

Наибольший интерес и наибольшую трудность по своей сложности представляет собой случай, имеющий место в физическом теле, в котором одновременно действуют друг на друга много молекул, причём колебания этих последних, благодаря их близкому соседству, не независимы друг от друга. Если когда-нибудь явится возможность вполне решить этот вопрос, то, пользуясь данными спектрального анализа, мы можем заранее предвычислить величины интермолекулярных сил, обусловленных взаимным лучеиспусканием молекул, указать законы зависимости их от температуры и, сравнивая эти вычисленные величины с наблюдаемыми на опыте, решить коренной вопрос молекулярной физики: сводятся ли все так называемые «молекулярные силы» к заранее известному и указанному выше пондеромоторному действию лучеиспускания, электромагнитным силам, или в состав их входят ещё и другие силы неизвестного до сих пор происхождения. Предвидеть результаты подобного исследования, а тем более утверждать, что все молекулярные силы обусловлены исключительно указанными электромагнитными силами, мы в настоящее время не имеем никаких оснований, но мы не можем не указать на характерные особенности их: эти силы не

зависят от масс молекул, они связаны с индивидуальными (спектральными) свойствами их и, кроме того, в сильной степени зависят от температуры, т. е. обладают именно теми свойствами, которые мы приписываем молекулярным силам в явлениях сцепления, растворения или химических реакций. Вопросы, здесь затронутые, как казалось мне, представляют большой интерес, почему я и взялся за их изучение.

Уже на первых порах развитие вышеизложенных представлений привело к любопытному результату. Стараясь доказать существование механического (пондеромоторного) действия световых колебаний на отдельные молекулы, я обратился к тому случаю, где условия этого действия представляют наибольшую простоту и доступны непосредственному наблюдению: в таких условиях находится разрежённый газ кометных хвостов, пронизываемый лучами солнца. Чтобы объяснить наблюдаемую в этих случаях *отталкивательную силу* солнца, я воспользовался таким соображением: на основании выводов Максвелла и Бартоли относительно величины светового давления мне удалось показать¹⁾, что ньютоновское притяжение солнца ослабляется отталкивательной силой его лучеиспускания, причём для тел малой массы, для микроскопических пылинок, отталкивательная сила начинает преобладать. Естественно поэтому предположить, что и наблюдаемое отталкивание отдельных молекул кометных хвостов обусловливается пондеромоторным действием света; гипотеза Целльнера об электризации солнца и кометных газов, которая появилась только для объяснения наблюдаемого отталкивания и заставляет предполагать какие-то особые, до сих пор неизвестные нам в лаборатории процессы электризации газов, гипотеза эта при указанном выше свойстве световых лучей делается излишней; в своей академической речи «О физических переменах в небесных телах» Ф. А. Бредихин²⁾

¹⁾ П. Лебедев, Труды Отд. физич. наук Общества любителей естествознания, т. 4, вып. 2, стр. 1 (1891 г.); Wied. Ann. 45, 292 (1891); Phil. Mag. (5) 33, 391 (1892). См. выше, стр. 60—65.

²⁾ Ф. А. Бредихин, «О физических переменах в небесных телах». Акад. речь, СПб, 1893.

обращает внимание на данное мной объяснение отталкивания кометных хвостов солнцем.

Переходя от световых сил, действующих в межпланетном пространстве, к тем же силам в интермолекулярных областях, приходится наиболее интересную общую задачу о пондеромоторном воздействии многих близких друг от друга и притом непрерывно перемещающихся молекул разбить на ряд отдельных по возможности простых вопросов, для того чтобы подготовить путь к решению общего случая.

Простейшей и ближайшей задачей естественно представляется вопрос о действии простой (монокроматической) волны на отдельную покоящуюся молекулу в зависимости от отношения периодов падающей волны и собственного периода молекулы. Решению этой задачи и были посвящены мои работы.

Непосредственно и притом в достаточно простой форме экспериментально исследовать действие света на отдельные молекулы какого-либо тела не представляется возможности, а потому я обратился к опытам с длинными электромагнитными волнами Гертца, заставляя их действовать на схематическую «молекулу», которая обладает интересующими нас свойствами иметь собственный период колебания, — ею является подвешенный на крутильной нити резонатор (см. гл. I). Изменяя по желанию период колебания резонатора (что не представляет каких-либо затруднений) и заставляя падать на него электромагнитную волну определённой длины, мы можем наблюдать образующиеся в этом случае пондеромоторные силы и установить законы их зависимости от резонанса¹⁾.

Дальнейшему ходу исследования представлялось два пути: или, оставаясь на почве электромагнитной теории света, пользуясь для опытов электромагнитными волнами, исследовать законы совместных колебаний двух, а затем и нескольких сопряжённых систем, имеющих собственные периоды колебаний, — вопрос, в настоящее время обстоя-

¹⁾ P. Lebedew, Wied. Ann. 52, 621 (1894). См. ниже, стр. 90—112.

тельно разработанный в статьях князя Б. Голицына, Обербекка и Вина, — для того чтобы потом обратиться к изучению действующих между указанными системами электромагнитных «интермолекулярных» сил, или другой путь, по которому всё исследование, так, как оно было сделано для электромагнитных колебаний, распространяется на *разного рода колебания*. Уже приступая к первой работе, я имел в виду вести её по этому второму пути — и вот почему: останавливаясь только на исследовании электромагнитных волн, мы тем самым ограничиваем и круг применения найденных нами законов такими системами, которые не представляют существенного отличия от наших металлических резонаторов с определёнными ёмкостями и кругами самоиндукции, но с которыми отождествлять действительные молекулы мы не имеем основания; перенося исследования на колебания, отличные по своей физической природе, и находя связь между законами их пондеромоторного действия на резонаторы, мы тем самым расширяем приложимость найденных законов и на те случаи, в которых как механизм самого колебания, так и механизм воспринимающего его резонатора может остаться неизвестным.

От электромагнитных волн я перешёл к исследованию гидродинамических колебаний, распространяя известные работы Бьеркнеса, изучившего пондеромоторные силы при независимых движениях, на явления колеблемого резонатора. В своих работах Бьеркнес, отыскивая аналогию между статическими явлениями электричества и магнетизма, с одной стороны, и гидродинамическими колебаниями — с другой, находит её не прямой, а обратной; вот почему особый интерес представляет собой найденный мною факт, что при сравнении электрических *колебаний с колебаниями* гидродинамическими эта аналогия оказывается полной и *прямой*¹⁾ (см. гл. II).

После этих работ я перешёл к изучению звуковых колебаний: тут представлялась возможность экспериментально исследовать действие звучащего источника не только

¹⁾ P. Lebedew, Więd. Anz. 59, 116 (1893). См. ниже, стр. 112—132.

на резонатор, находящийся в непосредственном соседстве его, но и проследить это действие при значительных расстояниях первого от последнего. Здесь открылась одна особенность явления, которая представлялась для меня совершенно неожиданной: в то время как в непосредственной близости от источника закон пондеромоторного действия акустической волны на её резонатор тождествен с соответствующим законом для электромагнитных, а также и для гидродинамических колебаний, при постепенном увеличении расстояния это тождество постепенно ступенькается, и его место занимает новый закон, совершенно отличный от предыдущего: так, при малых расстояниях наблюдается вблизи резонанса, при переходе через него, изменение от максимального притяжения через ноль (при полном резонансе) к максимальному отталкиванию резонатора источником, тогда как при увеличении расстояния от последнего притяжение, понемногу сглаживаясь, наконец, совершенно исчезает, и его место заступает отталкивание (наибольшая величина которого при полном резонансе) (см. гл. III)¹⁾. Долгое время эта особенность, это отличие от электромагнитных колебаний смущали меня, покуда мне не удалось показать теоретически, на основании особенностей распределения поляризации среды в проходящей волне, что такой случай *должен иметь место* и для электромагнитных волн²⁾ в том случае, если расстояния между источником и резонатором будут достаточно велики; в природе подобное явление (в более сложной форме) представляет собой отталкивательное действие солнечных лучей на газовые молекулы кометных хвостов.

Перечисленные работы ведут к тому интересному и новому результату, что, несмотря на всё различие, которое представляют собой, по своей физической природе, колебания электромагнитные, гидродинамические и акустические, законы пондеромоторного действия их на соответствующие

¹⁾ P. Lebedew, Wied. Ann. 62, 158 (1897). См. ниже, стр. 133—146.

²⁾ P. Lebedew, Wied. Ann. 62, 170 (1897). См. ниже, стр. 145—149.

резонаторы *тождественны*; это указывает нам на вероятность, что элементарные законы, нами найденные, общи для всех возможных (и ещё не исследованных нами) колебаний, и их обоснование надо искать в причинах, не зависящих от особенностей действующего колебания и возбуждаемого им резонатора.

Подводя итоги всему вышесказанному, мы видим, что электромагнитная гипотеза света приводит нас к необходимости признавать световые интермолекулярные силы, а дальнейшее изучение вопроса освобождает нас от этой гипотезы: оно показывает нам, что существование подобных сил мы должны допустить совершенно независимо от той или другой гипотезы относительно физической природы световых колебаний.

Перед нами открыто широкое поле — на основании полученных результатов изучать более сложные вопросы и, пользуясь непосредственным опытом, проверять на нём наши соображения или исследовать новые, может быть, неожиданные особенности интересующих нас пондеромоторных сил; осторожно и уверенно двигаясь по этому пути, мы можем подготовить и решение нашей главной задачи: пользуясь данными спектрального анализа, вычислить абсолютную величину сил взаимодействия молекул какого-нибудь тела, обусловленную их взаимным лучеиспусканием.

ГЛАВА I.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РЕЗОНАТОРЫ.

Первая попытка обнаружить пондеромоторные силы, вызываемые электрическими и магнитными действиями между двумя резонаторами, возбуждёнными электромагнитной волной, была сделана Boys, Briscoe и Watson¹⁾, и, несмотря на замечательную чувствительность метода, в котором ясно высказалась виртуозность такого знаменитого экспериментатора, как Boys, результат оказался отрицательным. При появлении этой работы план моего исследования пон-

¹⁾ C. V. Boys, A. E. Briscoe and W. Watson, Phil. Mag. (5) 31, 50 (1891).

деромоторного действия электромагнитной волны на резонатор, в зависимости от резонанса, был в основных чертах выяснен, и я приступил к его выполнению, несмотря на неудачу Boys'a и др., так как работы Герца¹⁾ позволяли предполагать возможность успеха. Трудности, с которыми приходилось сталкиваться, обуславливались главным образом новизной экспериментальной техники и лежали как в приёмах возбуждения правильных и достаточно сильных колебаний, так и в измерении длин волн резонаторов; наконец, выработка конструкции особого типа резонаторов, которая соединяла бы в себе возможность изменять в широких пределах его период с наименьшим весом прибора, — всё это заняло около трёх лет работы и повело к вполне удобному расположению опытов.

I. Расположение опытов.

Расположение опытов было в общих чертах следующее: первичный проводник Герца, который, благодаря быстрому затуханию колебаний в нём, сам не пригоден как источник волн, возбуждает колебания в металлическом проводнике, резонирующем на его колебания, — этот проводник мы будем называть *вибратором*; в вибраторе колебания затухают лишь весьма медленно, и поэтому им с успехом можно пользоваться как источником электромагнитных волн неизменного периода. Вблизи вибратора помещён подвешенный на крутильной нити очень лёгкий *резонатор* таким образом, что колебания вибратора возбуждают его, а вместе с тем стремятся повернуть его в ту или другую сторону, — углом кручения измеряются интересующие нас пондеромоторные силы; резонатор устроен так, что его период можно по произволу изменять в известных пределах и каждый раз определять этот период измерением длины волны, соответствующей резонатору.

Наблюдения производились таким образом: период резонатора по произволу изменялся, и потом определялась как длина соответствующей ему волны, так и величина

¹⁾ H. Hertz, Wied. Ann. 42, 407 (1891); Werke 2, p. 199.

действующей на него пондеромоторной силы; таким образом серия наблюдений даёт непосредственно искомую связь между длиной волны резонатора и величиной пондеромоторной силы при действии на резонатор неизменного источника колебаний.

При производстве подобных серий наблюдений приходится считаться с неудобством, что возбуждение вибратора колеблется в зависимости от непостоянства искры в первичном проводнике; для того чтобы сравнивать отдельные наблюдения кручения, величина возбуждения вибратора постоянно контролировалась особым аппаратом, по устройству сходным в одном случае с индукционным электродинамометром, а в другом — с электрометром, — мы будем называть его в последующем *индикатором*. Действия вибратора на резонатор и на индикатор наблюдались одновременно, и угол отклонения первого приводился путём вычисления к некоторому постоянному углу отклонения индикатора, т. е. к постоянному возбуждению вибратора.

Так как в общем случае действия электромагнитного колебания на резонатор, когда на этот последний влияют одновременно и магнитная и электрическая слагающие колебания, исследование не представляется достаточно простым, то опыты были поставлены таким образом, что в одном случае *только магнитная* составляющая колебания могла действовать на резонатор, а в другом — *только электрическая*; необходимые для изменения периода перемены в резонаторах делались в тех частях, на которые колебание не действует непосредственно, т. е. в конденсаторе резонатора в первом случае и в круге его самоиндукции во второй. Приборы, которые удовлетворяют указанным требованиям, в последующем обозначены «магнитными» и «электрическими».

II. Приборы.

1. *Возбудитель (первичный проводник)* имел следующее устройство: две цинковые полосы Z_1 и Z_2 (каждая по 20 см ширины и 45 см длины) изогнуты, как показано на рис. 10, и скреплены эбонитовыми клеммами E_1 и E_2 ;

чтобы избежать внутренних разрядов, эти цинковые полосы разделены тонкой эбонитовой стенкой (на рис. 10 не показанной). При таком устройстве незначительная самоиндукция так связана с довольно большой ёмкостью, что для каждого элемента dc конденсатора путь тока, проходящий через искру (и обозначенный на рис. 10 пунктиром), всюду имеет почти одинаковую длину; электростатическое действие на расстояние такого возбудителя ничтожно мало в том случае, когда полюс индуктория, связанный с внешней полосой Z_1 ,

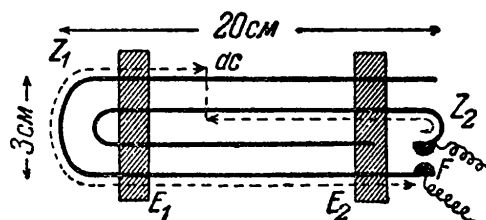


Рис. 10.

отведён к земле; такая особенность конструкции возбудителя является необходимым условием, чтобы отклонения подвешенного резонатора были обусловлены исключительно действиями колебательных зарядов, без примеси прямых электростатических сил, действие которых так резко сказывается в первичных проводниках Гертца. Искра перескакивала между двумя платиновыми колпачками ¹⁾ F . Для возбуждения служил маленький индукторий, который при трёх аккумуляторах давал 40 разрядов в секунду. Длина волны этого возбудителя, как показало измерение длин волн соответствующих ему вспомогательных резонаторов, была около $\lambda = 350$ см.

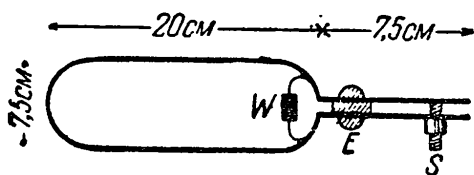


Рис. 11.

2. *Магнитный вибратор*, который был расположен над первичным проводником и возбуждался этим последним, состоял из цинковой полосы (20 см ширины и 65 см длины) и имел форму, указанную на рис. 11; эбонитовые прокладки E связывали концы полосы; эбонитовый винт S служил для того, чтобы помощью изменения расстояния между поверхностями конденсатора (которое было около 2 мм) изменять период колебания вибратора (в пределах от $\lambda_1 = 320$ см до $\lambda_2 = 380$ см) и настраивать его в резонанс

¹⁾ I. Klemen č i ě, Wied. Ann. 42, 467 (1891).

с возбудителем; раз настроенный, он в течение всей серии измерений оставался без изменения. Чтобы иметь возможность увеличивать затухание (без заметного изменения периода), можно было параллельно конденсатору вводить слабо проводящую колонну жидкости (с ничтожной величиной самоиндукции). Период колебания этого вибратора определялся непосредственно измерением соответствующей

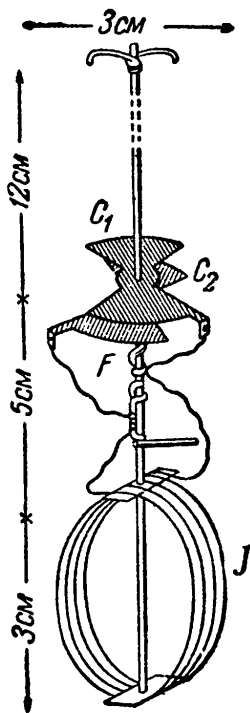


Рис. 12.

ему длины волны в проволоках (см. ниже); с этой целью к конденсатору присоединялся маленький искровой микрометр, который во время действия прибора как вибратора был удаляем.

Магнитное действие на расстоянии этого вибратора мы можем сравнить с действием рамки мультипликатора, по которой проходит переменный ток.

3. *Магнитный резонатор* изображён на рис. 12. Весь резонатор укреплен на тонком стеклянном стержне, который имеет наверху крючок для подвешивания к крутильной нити. Круг его самоиндукции состоит из четырёх оборотов тонкой серебряной проволоки J , а конденсатор образуют две пластинки C_1 и C_2 из алюминия (наподобие стрелок квадрант-электрометра Томсона). Верхняя из этих стрелок приклеена к стеклянному стержню,

а нижняя имеет втулку, обхватывающую этот стержень, и удерживается надетым на этот последний кольцом на неизменном расстоянии от верхней пластинки (эти детали на чертеже не видны); для изменения ёмкости конденсатора нижнюю пластинку можно вращать и потом закреплять воском; этим приёмом можно изменять длину волны резонатора в пределах от $\lambda = 280$ см до $\lambda = 420$ см, не изменяя момента инерции всей системы. Общий вес всего резонатора был 1 г.

Для измерения длины волны резонатора, соответствующей данному положению его конденсатора, которое производилось при помощи измерения длины волны в проволоках,

на стеклянном стержне устроен искровой микрометр F : искра образуется между двумя платиновыми ушками, из которых одно можно достаточно удобно уставлять при помощи выступающей проволочки (см. рис. 12). Во время определения механического действия колебания эти ушки находились на таком расстоянии друг от друга, что и при самых сильных возбуждениях искр между ними не могло пере-скакивать.

Из расположения конденсатора видно, что электрическая слагающая колебания, действуя на накапливаемые на нём заряды, по условиям симметрии *не может* вызвать сил, вращающих крутильную нить; *только магнитные силы*, действуя на круг самоиндукции, могут поворачивать резонатор. Во время исследования этих сил резонатор помещался на расстоянии около 8 см над магнитным вибратором и в положении равновесия был установлен так, что его магнитная ось составляла угол, близкий к 45° , с линиями магнитных сил вибратора; при указанном расположении приборов электрическая слагающая колебания, которая не может действовать пондеромоторно на резонатор, не могла и возбуждать его. Резонатор находился, следовательно, под действием *исключительно магнитных сил*.

Мы можем рассматривать наш резонатор, как катушку индукционного динамометра, концы которой соединены не между собой, а связаны с обкладками конденсатора, благодаря чему вся система имеет определённый собственный период колебаний.

4. *Магнитный индикатор* представляет собой замкнутое проволочное кольцо ($D = 15$ мм) из тонкой серебряной проволоки; он был помещён внутри магнитного вибратора, подвешен на крутильной нити и так же ориентирован, как резонатор; прибор представляет собой, таким образом, простой индукционный динамометр.

5. *Электрический вибратор* (рис. 13) состоял из двух цинковых пластинок P_1 и P_2 (40×40 см), связанных между собой металлической полосой (20 см ширины и 55 см

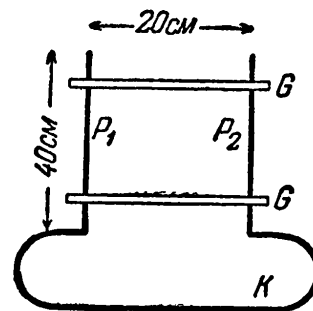


Рис. 13.

длины) и удерживаемых друг против друга на расстоянии 25 см четырьмя стеклянными стержнями G, G ; когда первичный проводник (1) возбуждает колебания в электрическом вибраторе, то между пластинками P_1 и P_2 образуется электрическое поле, достаточно равномерное. Длина волны этого вибратора определялась так же, как в случае магнитного вибратора (2), и была около 350 см.

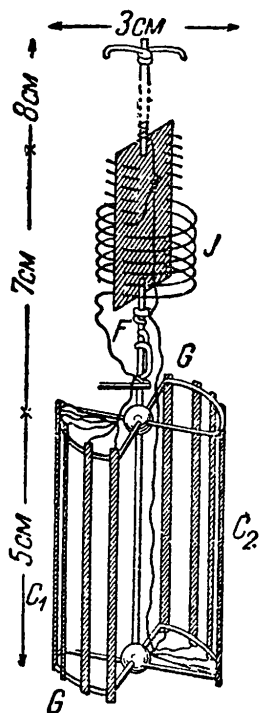


Рис. 14.

6. *Электрический резонатор* (рис. 14) укреплен на тонком стеклянном стержне, снабженном наверху крючками для подвешивания к крутильной нити. Круг самоиндукции J представляет собой длинный соленоид из тонкой серебряной проволоки, укрепленной на бумажной пластинке; конденсатором служат два цилиндрических квадрата C_1 и C_2 , которые для уменьшения момента инерции состоят не из сплошных металлических пластинок, а из отдельных алюминиевых полосок (по 2 мм ширины, 0,01 мм толщины, по пяти с каждой стороны), натянутых между стеклянными рамками G, G . Для изменения длины волны этого резонатора в пределах от $\lambda_1 = 280$ см до $\lambda_2 = 440$ см проволока в верхней части

соленоида перестригалась, число оборотов соленоида уменьшалось удалением некоторых из них или увеличивалось прибавлением новых слоёв, и затем свободные концы загибались и припаивались друг к другу по возможности близко от оси вращения для того, чтобы момент инерции оставался без заметного изменения.

Общий вес этого резонатора был 0,8 г.

Искровой микрометр F , необходимый для определения длины волны резонатора, был устроен и употреблялся так же, как при магнитном резонаторе (3).

Из расположения соленоида видно, что магнитная слабая электрического колебания *не может* вызвать сил, вращающих крутильную нить: *только электрические силы*, действуя на накопленные на квадрантах заряды, могут

поворачивать резонатор. Во время исследования этих сил резонатор помещался между пластинами электрического вибратора (5) так, что плоскость, проходящая через ось вращения и делящая квадранты C_1 и C_2 пополам, составляла угол, близкий к 45° , с линиями сил электрического поля вибратора; при таком расположении приборов магнитная сила колебания, не действующая на резонатор пондеромоторно, не могла и возбуждать его. Резонатор находился таким образом под действием *исключительно электрических сил*.

Этот резонатор мы можем уподобить стрелке квадрант-электрометра, половины которой связаны друг с другом не непосредственно, а проводником с достаточной самоиндукцией, благодаря чему вся система получает определённый период колебания.

7. *Электрический индикатор* представляет собой короткую стрелку электрометра, помещённую между двумя проволоками, связанными с пластинами P_1 и P_2 электрического вибратора (5), и подвешенную на крутильной нити. Прибор представляет собой, следовательно, обыкновенный электрометр.

8. *Зеркальный отсчёт*. Так как при наблюдениях необходимо отсчитывать отклонение резонатора и индикатора одновременно, то этот отсчёт производился при помощи одной трубы: труба была уставлена в плоскости крутильных нитей так, что зеркало при нити резонатора было расположено несколько выше, а зеркало индикатора — несколько ниже оптической оси трубы. В положении равновесия нормали обоих зеркал были слегка повернуты одна вправо, другая — влево от оси трубы; поэтому можно было одновременно наблюдать две соответственно расположенные скалы; выгодно расположить их так, чтобы изображения делений почти соприкасались вдоль горизонтальной паутинки, поэтому на одной скале цифры должны быть вверху, на другой — внизу делений. Эти скалы, расположенные на широких планках, были вычернены вплоть до делений, отчего оба изображения в поле зрения трубы были видны вполне резко. Для избежания ошибок была выбрана различная нумерация (от 0 до 500 и от 500 до 1000).

Крутильные нити были вытянуты мною по способу Boys'а из *кварца* и были настолько тонки, что давали для индикаторов период половины качания в 10 сек., а для резонаторов — 12—18 сек., что в свою очередь позволяло с удобством наблюдать точки поворота одну за другой.

Для избежания воздушных течений как резонаторы, так и индикаторы были окружены двойными картонными защитами, которые, беспрепятственно пропуская электромагнитные колебания, хорошо задерживали движение воздуха. Чтобы не порвать нити, вставляя и вынимая резонатор, была устроена вилка, которая действовала подобно арретирующему приспособлению весов.

III. Измерения длины волн резонаторов.

а) Предварительные исследования.

Определение длины волны, соответствующей данному резонатору, после замечательного открытия так называемого «многократного резонанса» Sarasin et de la Rive¹⁾ сводится к весьма простому способу определения узловых точек стоячей электромагнитной волны (по отсутствию возбуждения в резонаторе) и измерения расстояния между ними; это определение делается особенно удобным, как показали названные авторы, когда волна распространяется между двумя проволоками. Указанным методом пользовались при своих исследованиях Бьеркнес²⁾, Blondlot³⁾ и Perot⁴⁾, причём, однако, следуя Гертцу⁵⁾, старались брать первичный проводник, близко настроенный к периоду резонатора.

На характерную ошибку, вытекающую из этого последнего обстоятельства, на неприложимость закона Sarasin et de la Rive'а в непосредственной близости резонанса указывает Биркеланд⁶⁾; когда длина волны, соответствующая

¹⁾ E. Sarasin et de la Rive, Archives de Genève (3) 23, 113 (1890); 29, 441 (1893); Beibl. 14, 419 (1890); 17, 967 (1893).

²⁾ V. Bjerknes, Wied. Ann. 44, 78 (1891).

³⁾ R. Blondlot, Journ. de Phys. (2) 10, 558 (1891).

⁴⁾ A. Perot, Compt. rend. 114, 1523 (1892).

⁵⁾ H. Hertz, Wied. Ann. 34, 558 (1888).

⁶⁾ K. Birkeland, Wied. Ann. 47, 611 (1892).

вибратору, значительно меньше длины волны резонатора, то измеряемая вышеуказанным способом длина последней постоянна (она не отступает заметно от истинной величины её, как увидим ниже); увеличивая постепенно длину волны первичного проводника, мы найдём, что измеряемая резонатором и долженствующая ему соответствовать длина волны понемногу уменьшается, достигает минимума, затем при переходе через резонанс быстро достигает максимума и при дальнейшем увеличении волны первичного проводника, уменьшаясь, стремится к той постоянной величине, которая наблюдалась и до перехода через резонанс; характер описываемого здесь изменения графически изображён на рис. 15: по абсциссе P_1P_2 отложены длины волн первичного проводника, а ординаты дают измеренную резонатором длину волны; таким образом, именно вблизи резонанса закон Sarasin et de la Rive'a о не-

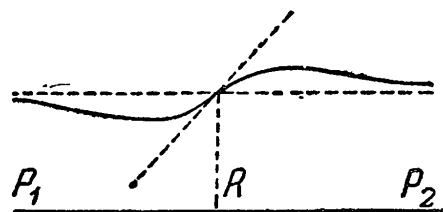


Рис. 15.

зависимости измеряемой резонатором волны от периода первичного проводника не имеет места, и всякий случайный небольшой недочёт в настройке вводит соответствующую ему ошибку в измерение волны резонатора. По Биркеланду максимальное отступление может доходить до $\pm 0,04 \lambda$; так как помянутый автор не указывает способа избавиться от этой ошибки, то по этому вопросу мною были предприняты исследования, которые показали, что величина этого отступления зависит от декремента затухания первичного проводника и делается тем меньше, чем ближе колебания первичного проводника подходят к движению аperiodическому, соответствующему одному сильному толчку; вот почему я стремился увеличить этот декремент как тем, что вводил в путь тока первичного проводника достаточно большие сопротивления, так и тем, что на основании опытов Бьеркнеса¹⁾ ставил коллекторные пластинки, связанные с проволоками, весьма близко к обкладкам первичного проводника; благодаря такому приёму

¹⁾ V. B j e r k n e s, Wied. Ann. 44, 524 (1891).

максимальное отступление упало до $\pm 0,003 \lambda$, и от него легко было избавиться, делая определения при двух длинах волн первичного проводника, отличающихся от полного резонанса на $\pm 0,1 \lambda$, и выводя из них среднее.

Что касается до зависимости измеряемой резонатором длины волны от проволок, вдоль которых распространяются волны, то её удалось обнаружить таким образом: две длинные (от 6 до 8λ) параллельные медные проволоки были связаны между собой, как мостом, широкой металлической пластиной (по ту сторону этого моста электромагнитные

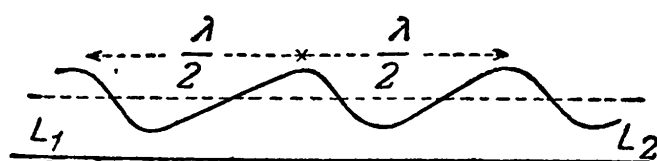


Рис. 16.

движения в проволоках были ничтожно малы, и мы можем, следовательно, принять, что около моста проволоки как бы оканчивались и были отрезаны от ча-

стей, лежащих за мостом); передвигая мост, можно было по произволу удлинять и укорачивать проволоки на небольшие отрезки (например по 25 см). Измерения длины волны резонатора дали величины непостоянные: увеличивая длину проволоки, мы замечаем сначала, что измеряемая длина волны уменьшается, достигает минимума, быстро переходит на максимум, потом снова уменьшается и т. д., периодически колеблясь в пределах около $\pm 0,03 \lambda$; эти колебания изображены на рис. 16, причём по абсциссе $L_1 L_2$ отнесены приросты длины проволок, а ординатам соответствуют измеренные длины волн резонатора. Та особенность, что одинаковые отступления повторяются на длине в полволны (как показано на рис. 16), указывает нам, что пертурбирующей причиной является волна, после того как она, пробежав один раз по проволокам, снова возвращается, отразившись у свободного (т. е. обращённого к первичному проводнику) конца системы; это действие отражённой волны мне удалось сделать безвредным, заставляя бежать её не по медным, а по *железным* проволокам, в которых, по исследованиям Биркеланда¹⁾,

¹⁾ K. Birkeland, *Compt. rend.* 116, 93 (1893); *Veibl.* 17, 1099 (1893).

двигающаяся волна сильно затухает: отражённая волна, предварительно пробежав два раза вдоль железной проволоки, настолько слабеет, что не может уже произвести какое-либо пертурбирующее действие; и, действительно, указанное выше периодическое колебание сделалось в десять раз меньше (т. е. $\pm 0,003\lambda$), т. е. стало ниже погрешности отдельного наблюдения.

Результаты этих предварительных исследований указывают, что при тщательных определениях длины волн резонаторов методы, употреблённые другими наблюдателями, недостаточны и могут случайно привести к систематическим ошибкам до $\pm 0,05\lambda$, тогда как указанный мною приём даёт возможность измерять указанную величину до $\pm 0,003\lambda$ свободной от систематических ошибок.

б) Окончательное расположение.

Первичный проводник состоял (рис. 17) из двух параллельных медных проводников (длина 50 см, расстояние

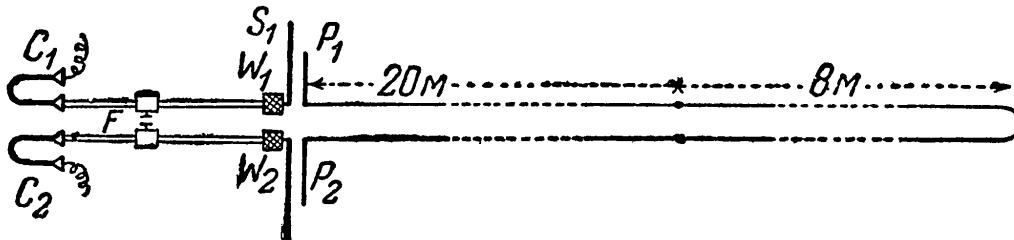


Рис. 17.

между проводниками 6 см), вдоль которых можно было перемещать искровой промежуток F , погружённый в вазелиновое масло¹⁾; трубки C_1 и C_2 со столбиками воды были включены между ним и индукторием для избежания слишком тёплых искр²⁾. Помощью двух сопротивлений W_1 и W_2 , около 150 ом каждое, из раствора медного купороса, медные проводники были соединены с обкладками S_1 и S_2 (диски $D = 30$ см); перед каждой из этих обкладок

¹⁾ Sarasin et de la Rive, Compt. Rend. 115, 439 (1892); Arch. de Genève (3) 28, 306 (1892); Beibl. 17, 597 (1893).

²⁾ Töpler, Wied. Ann. 46, 467 (1892).

находилось по металлической пластинке P_1 и P_2 , от которых шли *железные* проволоки, длиной в 20 метров и толщиной в 0,6 мм, натянутые параллельно на расстоянии 6 см; железные проволоки оканчивались *медными* проволоками той же толщины и длиной в 8 метров, свободные концы которых были соединены друг с другом; вдоль этих последних и определялись длины волн резонаторов. Вся система проводников находилась по возможности далеко от стены (по меньшей мере 0,8 метра); во избежание «внутренних» отражений, которые, как показал v. Geitler¹⁾, могут быть значительны, параллелизм проволок проверялся с особой тщательностью.

Чтобы при повторных измерениях избежать влияний каких-либо привычных меток, масштаб был устроен в виде невидимых при слабом освещении проволочных колец, размещённых через каждые 50 см на одной из проволок. Расстояния между этими метками и местами установок точно определялись при помощи деревянного масштаба.

Длины волн, соответствующие описанному выше первичному проводнику, при различных положениях его искрового промежутка, были определены при помощи настроенного с ним в унисон вспомогательного резонатора²⁾ и лежали в пределах от $\lambda_1 = 260$ см до $\lambda_2 = 460$ см. Графическая табличка позволяла быстро находить то положение искрового промежутка, для которого длина волны первичного проводника имела необходимую при данном определении величину.

Длина волны резонатора измерялась расстоянием между первым и третьим узлом; самый узел определялся тем, что наблюдалось погасание искры в резонаторе при приближении к узлу с той и с другой стороны: обе точки отмечались маленькими подвижными-резиновыми метками, и определялась середина между ними. Из нескольких сот наблюдений можно было установить, что этот «тёмный ход»³⁾ резонатора нельзя делать очень малым, самая подходящая для него величина оказалась 0,15 λ . При некотором навыке

1) J. v. Geitler, Wied. Ann. 49, 195 (1893).

2) Bjerknæs, цит. выше, стр. 78.

3) Blondlot, цит. выше, стр. 558.

легко получать замечательную точность: так, отдельные отсчёты обыкновенно не отличаются друг от друга больше чем на $\pm 0,005 \lambda$.

Определение длины волны резонатора состоит в следующем: сначала эта длина определяется приблизительно при какой-нибудь длине волны первичного проводника, и, пользуясь этим указанием, переходят к измерению этой длины при длинах волн первичного проводника на $0,1 \lambda$ большей или меньшей против измеряемой волны; для каждого случая расстояние между узлами определяется по четыре раза, и затем выводят среднее из этих наблюдений.

Найденная указанным способом длина волны соответствует резонатору при совершенно определённом положении микрометра; ввиду малых электростатических ёмкостей резонаторов можно предположить, что та заранее неопределимая ёмкость, которую представляли собой два весьма близких друг от друга ушка микрометра, в заметной степени изменяет период резонатора; тщательные опыты показали, что весьма значительные изменения в длине микрометрической искры остаются без влияния на измеряемую длину волны. Мы можем, следовательно, допустить, что и ещё больше увеличивая это микрометрическое расстояние (2—3 мм), как то необходимо при определении пондеромоторных сил, мы уменьшаем периоды резонаторов на ничтожную величину, что не может никаким образом отозваться на характере наблюдаемых нами явлений.

IV. Наблюдения.

Приступая к изучению пондеромоторных сил, я предварительно убедился, что *отношение* отклонений резонатора и индикатора есть величина *постоянная* и не зависит ни от величины искры в первичном проводнике, ни от расстояния его от вибратора. Электростатические влияния (при чрезмерно большом искровом перерыве в первичном проводнике) были настолько малы, что никакого заметного отклонения не вызывали.

Каждое единичное наблюдение слагалось из определения длины волны резонатора, которое производилось

указанным выше способом, и из определения крутильной силы; эта последняя определялась следующим образом: резонатор подвешивался на кварцевую нить крутильного прибора и после некоторого колебания успокаивался; тогда производился отсчёт нулевого положения резонатора и индикатора и замыкался ток, возбуждающий индукторий; через 10 секунд, с десятым ударом метронома, ток прерывался, и наблюдались точки поворота как индикатора, так и резонатора. Указанное наблюдение было повторяемо восемь раз подряд, и отсюда выводилась средняя величина.

Чтобы иллюстрировать эти отдельные измерения, я позволю себе привести здесь два протокола записей, относящихся к двум нижеприведённым таблицам.

В этих протоколах обозначают:

P — длина волны (в сантиметрах) первичного проводника, при которой производилось измерение λ резонатора.

λ — наблюдаемое расстояние между первым и третьим узлом при определении длины волны резонатора.

J — наблюдаемое отклонение индикатора в деления скалы.

Магнитный резонатор. (Табл. I. Наблюд. № 3.)

P	λ	J	R	$R_{J=180}$
300 {	333	184	+ 8,3	+ 8,1
	329	183	7,2	7,1
	329	180	7,7	7,7
	332	185	7,7	7,5
360 {	331 ± 2	186	7,5	7,3
	331	172	8,0	8,3
	334	186	7,2	7,0
	333	178	+ 7,6	+ 7,5
	328			+ 7,6
	331,5 ± 2 .			

$$\lambda = 331 \text{ см} \pm 2; R_{J=180} = + 7,6 \pm 0,4.$$

R — наблюдаемое отклонение резонатора в делениях скалы при определении крутильных сил; о знаке см. ниже. $R_{J=180}$ и $R_{J=40}$ — отклонения резонатора, приведённые к отклонению индикатора в 180 и в 40 делений скалы.

Электрический резонатор. (Табл. II. Наблюд. № 3.)

P	λ	J	R	$R_{J=40}$
335	372	32	— 14,5	— 18,1
	372	34	13,5	15,4
	377	40	16,7	16,7
	373	41	16,5	16,1
415	374 ± 2	38	14,5	15,3
	375	37	14,0	15,0
	378	43	16,9	14,9
	379	36	— 13,0	— 14,6
	375			— 15,7
	$376,5 \pm 2.$			

$$\lambda = 375 \text{ см} \pm 2; R_{J=40} = -15,7 \pm 0,9.$$

Из многочисленных серий наблюдений я считаю достаточным привести только две, из которых одна относится к магнитному, а другая к электрическому резонатору, ввиду того, что все сделанные мною наблюдения представляют *тождественный ход явления*.

В нижеприведённых таблицах N обозначает номер наблюдения, а λ и R имеют вышесказанное значение. Что касается до знака при R , то (+) обозначает такое вращение, при котором угол между силовыми линиями поля резонатора и поля вибратора стремится уменьшиться; таким образом знак (+) соответствует притяжению между силовыми линиями, тогда как знак (—) соответствует вращению в обратную сторону, т. е. отталкиванию между ними. Рис. 18 и 19 представляют графическое изображение пондеромоторных сил; по абсциссам отнесены λ , а по ординатам R ; v обозначает длину волны вибратора,

Таблица I.
Магнитный резонатор.

N	λ	$R_{J=180}$
5	301 ± 2	$+ 3,4 \pm 0,4$
4	311 ± 2	$+ 3,8 \pm 0,3$
3	331 ± 2	$+ 7,6 \pm 0,4$
2	$340 \pm 2,5$	$+ 14,8 \pm 1,0$
8	351 ± 2	$+ 52,0 \pm 3,0$
1	$371 \pm 1,5$	$- 18,8 \pm 0,6$
7	389 ± 2	$- 8,5 \pm 0,2$
6	$414 \pm 2,5$	$- 4,5 \pm 0,3$

Рис. 18.

Длина волны магнитного вибратора $\nu = 359 \text{ см} \pm 6$.

Таблица II.
Электрический резонатор.

N	λ	$R_{J=40}$
7	283 ± 1	$+ 7,6 \pm 1,3$
4	$323 \pm 1,5$	$+ 14,6 \pm 0,5$
6	$333 \pm 1,5$	$+ 19,5 \pm 2,4$
5	359 ± 2	$- 22,6 \pm 1,4$
3	376 ± 2	$- 15,7 \pm 0,9$
2	$389 \pm 1,5$	$- 8,1 \pm 0,8$
1	$418 \pm 1,5$	$- 4,7 \pm 0,5$

Рис. 19.

Длина волны электрического вибратора $\nu = 346 \text{ см} \pm 5$.

Результаты вышеприведённых наблюдений можно формулировать таким образом:

1. Законы пондеромоторного действия волн на магнитные и электрические резонаторы тождественны.

2. Когда резонаторы настроены выше, то падающая на них волна вращает их так, чтобы возбуждение их увеличивалось; когда резонаторы настроены ниже, то вращение влечёт за собой уменьшение возбуждения.

3. Наибольшие величины этих противоположных сил имеют место в непосредственной близости резонанса.

Все попытки проследить явление при постепенном переходе через резонанс не привели к желаемому результату: в этой области возбуждение резонатора весьма сильно, и тонкая проволока их кругов самоиндукции настолько сильно разогревается, что образовавшиеся при этом воздушные течения заставляли резонатор неправильно колебаться и совершенно маскировали те небольшие пондеромоторные силы электрических колебаний, которые имеют место при переходе через ноль.

С магнитным резонатором я произвёл целый ряд опытов при самых разнообразных условиях. Так, вибратор настраивался выше или ниже возбуждающего первичного проводника; максимальные величины отклонений передвигались соответственно изменившейся длине волны вибратора. Когда в вибратор было введено ответвление W (рис. 11), благодаря чему декремент его затухания значительно увеличился, то отклонение как резонатора, так и индикатора сильно уменьшилось, но отношение их осталось без изменения.

Опыты, которые я делал раньше с приборами гораздо менее совершенными (и здесь не описанными), дали те же самые результаты.

Для точного количественного исследования явления, в особенности вблизи резонанса, потребуются, повидимому, приборы, совершенно отличные от тех, которые были в моём распоряжении.

V. Теория пондеромоторного действия электромагнитных волн на резонаторы.

Механическое действие волн на резонатор в зависимости от собственного периода резонатора можно вычислить, если сделать два предположения: первое относительно закона возбуждения резонатора и второе относительно механического взаимодействия возбуждающего и возбуждённого движения.

В нижеследующем мы рассмотрим вычисления для случая, когда возбуждающее движение $f(t)$ представляет затухающее синусоидальное колебание вида:

$$f(t) = \alpha e^{-\alpha t} \cos at, \quad (\text{A})$$

где α — начальная амплитуда, a пропорционально числу колебаний и α — затухание.

Если мы предположим, как это делает Бьеркнес¹⁾, что возбуждение электромагнитного резонатора следует тем же законам, как и затухающее колебание маятника под действием периодической затухающей силы, то это возбуждение может быть представлено как сложное, состоящее из принуждённого колебания и свободного — собственного, число колебаний которого и затухание характеризуются самим резонатором. В нашем случае это движение $\varphi(t)$:

$$\varphi(t) = A e^{-\alpha t} \sin(at + a') + B e^{-\beta t} \sin(bt + b'). \quad (\text{B})$$

Здесь постоянные имеют следующие значения:

$$A = \frac{\alpha a^2}{\sqrt{[b^2 + (\alpha - \beta)^2 - a^2]^2 + 4a^2(\alpha - \beta)^2}},$$

$$a' = \operatorname{arctg} \frac{1}{2a} \cdot \frac{a^2 - (\alpha - \beta)^2 - b^2}{\alpha - \beta},$$

$$B = -A \pm \frac{\sqrt{b^2 + (\alpha - \beta)^2}}{b},$$

$$b' = \operatorname{arctg} \frac{b}{a^2 + (\alpha - \beta)^2 + b^2} \cdot \frac{a^2 - (\alpha - \beta)^2 - b^2}{\alpha - \beta}.$$

Амплитуда A имеет тот же знак, что $\beta - \alpha$, а фазы a' и b' лежат между $+\frac{\pi}{2}$ и $-\frac{\pi}{2}$.

Предположим далее, что импульс dK механической силы для любого элемента времени dt пропорционален произведению возбуждающего и возбуждённого движения, другими словами — пусть имеют место законы Кулона и Ампера. Итак, положим:

$$dK = f(t) \varphi(t) dt. \quad (\text{C})$$

¹⁾ V. B j e r k n e s, цит. выше, стр. 81.

Если мы будем под словом «движение» разумеать магнитное и электрическое состояние поляризации среды, определяемое возбуждающим и возбуждённым колебанием, то импульс dK будет обозначать притягательную силу, так как мы считаем две поляризации одинаково направленными, когда их силовые линии образуют острый угол, а действующие механические силы соответствуют тогда притяжению. Едва ли стоит указывать на то, что мы получим те же результаты, если будем рассматривать вместо поляризации явления индукции и ход измерения электрических зарядов резонатора.

Если требуется вычислить полный импульс за промежуток времени, в течение которого колебания затухают до исчезающе малой доли своей первоначальной величины, то можно распространить интеграцию до $t = \infty$, что облегчает вычисления.

$$K = \int_0^{\infty} f(t) \varphi(t) dt. \quad (D)$$

Величина K прямо пропорциональна притягательной силе. Интеграция без труда приводится к интегралам Коши и даёт:

$$K = \frac{Aa}{2} \left[\frac{\sin a'}{2a} + \frac{a \sin a' + a \cos a'}{2(a^2 + a^2)} \right] + \\ + \frac{Ba}{2} \left[\frac{(\alpha + \beta) \sin b' + (b - a) \cos b'}{(\alpha + \beta)^2 + (a - b)^2} + \frac{(\alpha + \beta) \sin b' + (a + b) \cos b'}{(\alpha + \beta)^2 + (a + b)^2} \right]. \quad (1)$$

Это выражение существенно упрощается, если мы ограничимся небольшими отклонениями от резонанса и предположим, что затухания α и β малы. Тогда можно пренебречь членами, которые содержат в знаменателе a^2 или $(a + b)^2$, и положить:

$$B = -A; \\ \operatorname{tg} b' = \operatorname{tg} a'.$$

После соответствующих преобразований получаем:

$$K' = \frac{\alpha^2 (b^2 - a^2) a^2}{(b^2 - a^2)^2 + 4a^2 (\alpha - \beta)^2} \left[\frac{1}{2a} - \frac{2\beta}{(\alpha + \beta)^2 + (b - a)^2} \right]. \quad (2)$$

В непосредственной близости резонанса, где можно $(b^2 - a^2)$ заменить через $2a(b - a)$, выражение (2) может быть ещё более упрощено, именно:

$$K'_R = \frac{\alpha^2}{4\alpha} \cdot \frac{a(b-a)}{(\alpha + \beta)^2 + (b-a)^2}. \quad (3a)$$

Если же мы будем отвлекаться от области, непосредственно прилегающей к резонансу, то $(b - a)$ велико по сравнению с α и β , и выражение (2) можно упростить другим путём:

$$K'_r = \frac{\alpha^2}{4\alpha} \cdot \frac{2}{\left(\frac{b}{a}\right)^2 - 1}. \quad (3b)$$

Оба уравнения (3a) и (3b) можно написать несколько иначе, если мы введём количество энергии, падающей на резонатор. Для каждого элемента времени dt количество энергии dE , проходящее через среду, пропорционально $[f(t)]^2 dt$; количество энергии E , попавшей за всё время на резонатор ¹⁾:

$$E = \alpha^2 \int_0^{\infty} e^{-2\alpha t} \cos^2 at \, dt = \frac{\alpha^2}{4\alpha}.$$

Поэтому можем написать:

$$K_R = E \frac{a(b-a)}{(\alpha + \beta)^2 + (b-a)^2}; \quad (I)^*$$

$$K_r = E \frac{2}{\left(\frac{b}{a}\right)^2 - 1}. \quad (II)$$

Рис. 20 иллюстрирует ход изменения механической силы, действующей на резонатор, для случая, когда возбуждающее колебание постоянно, а период и затухание резонатора переменны. Положительные ординаты соответствуют притяжению, отрицательные — отталкиванию.

Кривые рис. 20 охватывают область $(b - a) = \pm 10\alpha$.

¹⁾ См. V. Bjerknæs, цит. выше, стр. 84.

Чтобы рис. 20 находился в соответствии с рис. 18 и 19 на стр. 106, на оси абсцисс отложены не числа колебаний, а соответствующие им обратные величины, т. е. длины волн, которые на диаграмме возрастают слева направо.

Результаты можно формулировать следующим образом:

1. Механическое действие возбуждающей волны на резонатор прямо пропорционально количеству падающей на него энергии и зависит только от отношения чисел колебания, а не от их абсолютных величин.

2. Выше настроенный резонатор притягивается возбуждающим его источником колебаний, ниже настроенный — отталкивается; максимумы этих противоположных действий лежат в непосредственном соседстве с резонансом и непрерывно переходят друг в друга; по отношению к области полного резонанса ход явления симметричен.

3. Наибольшие величины механических сил лежат при $(b - a) = \pm (\alpha + \beta)$ и достигают при прочих равных условиях значений, обратно пропорциональных $(\alpha + \beta)$.

Нетрудно также вычислить ход изменения механических сил для случая, когда в качестве источника колебаний служит вибратор, возбуждаемый первичным проводником; при этом помимо слабо затухающих колебаний вибратора с числом колебаний a и затуханием α надо считаться с колебаниями первичного проводника, которые быстро затухают благодаря большому затуханию γ возбудителя; вследствие этих колебаний надо принимать в расчёт в выражениях (I) и (II) поправочные члены, величины которых относятся к K как α и γ , а так как α по сравнению с γ очень мало

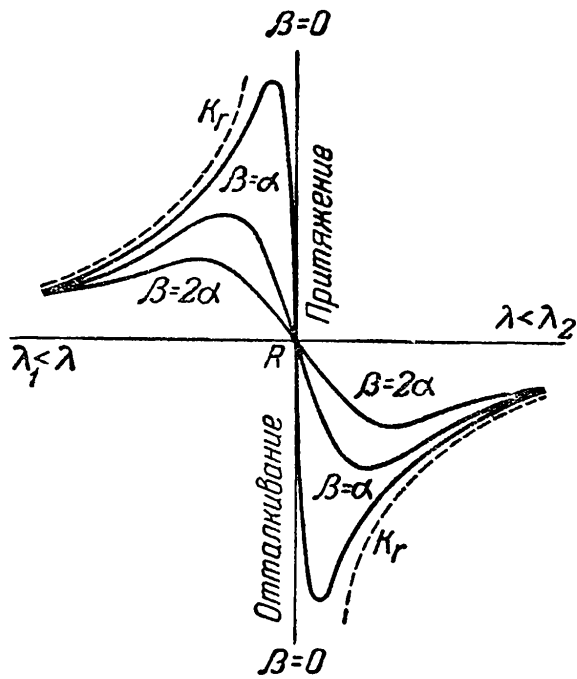


Рис. 20.

(по Бьеркнесу ¹⁾) отношение $\frac{\alpha}{\gamma}$ едва достигает одной сотой), то в первом приближении уравнения (I) и (II) приложимы и к нашим измерениям.

Следовательно, лежащие в основе приведённых вычислений предположения приводят к результатам, согласным с наблюдениями, а поэтому мы можем считать эти предположения правильными.

VI. Заключение.

Подводя итог, мы приходим к следующим выводам:

1. Закон механического действия электромагнитного колебания на резонатор может быть установлен из опыта и оказывается тождественным как для электрической, так и для магнитной слагающей колебания.

2. Наблюдаемые явления могут быть без труда объяснены, если мы сделаем следующие предположения:

а) Возбуждение электрического резонатора следует, по В. Бьеркнесу, законам, которым подчиняются все упругие колебания.

б) Законы Кулона и Ампера сохраняют силу и для электрических колебаний.

Если мы станем на точку зрения электромагнитной теории света, если мы сделаем допущение, что волны Гертца суть световые волны большого периода, то мы можем наши опыты рассматривать как попытку на чрезмерно больших схематических моделях молекул в основных чертах исследовать законы тех *молекулярных сил*, которые обусловлены взаимным лучеиспусканием молекул.

Г Л А В А II.

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЗОНАТОРЫ.

Классические исследования К. А. Бьеркнеса над механическим взаимодействием двух шаров, независимо колеблющихся (пульсирующих и осциллирующих) в несжимаемой жидкости, иллюстрированные им замечательными

¹⁾ V. B j e r k n e s, цит. выше, стр. 89.

опытами¹⁾, знакомят нас с рядом *обратных* аналогий между указанными гидродинамическими силами и известными пондеромоторными силами в случае статической электрической или магнитной поляризации. Мне удалось дополнить исследования Бьеркнеса изучением того случая, когда один из шаров колеблется не независимо, а представляет собой резонатор, возбуждаемый движением окружающей его жидкости, т. е. исследовать вопрос, по существу тождественный с тем, который был мною разобран для электромагнитных колебаний; приступая к опытам, я ожидал встретить аналогию между указанными двумя классами явлений, и эта аналогия оказалась *прямою*, т. е. законы зависимости пондеромоторных сил от резонанса оказались *тождественными* с законами для электромагнитных колебаний. Своё исследование я ограничил осциллирующими резонаторами и изучал явления притяжения и отталкивания.

1. Расположение опытов.

Источником колебаний служил в моих опытах шарик, укрепленный на стержне, связанном с колеблющим его электродвигателем. *Резонатором* служил упругий маятник, состоящий из металлического шарика на плоской стальной пружине (подобным резонатором для совсем других целей пользовался уже К. А. Бьеркнес²⁾). Оба шарика находились в воде.

Для того чтобы наблюдать пондеромоторные силы, которые обусловлены *только* колебанием шариков независимо от всех других сил, которые испытывают тела вблизи колеблющегося шарика, было взято тело, тождественное по своему внешнему виду с резонатором, но не имеющее его периода колебания; резонатор и компенсирующее его тело накрепко соединялись между собой, располагались симметрично относительно осциллирующего шарика и подвешивались на крутильную проволоку. Углом кручения измерялась *разность* двух гидродинамических сил, которая

¹⁾ С. А. B j e r k n e s, Exner's Rep. 19, 289 (1883).

²⁾ С. А. B j e r k n e s, Exner's Rep. 19, 309 (1883).

обусловливалась исключительно колебанием резонатора и была независима от других внешних особенностей резонатора.

По отношению к осциллирующему шарикау резонатор располагался как в направлении полярной, так и в экваториальной плоскости, что давало возможность исследовать интересные нас силы как для продольных, так и для поперечных колебаний.

В отдельных сериях наблюдений самый резонатор, а также амплитуда осциллирующего шарика оставались без изменения; силы, крутящие проволоку подвеса, измерялись для различного числа колебаний осциллирующего шарика, и таким образом определялась зависимость её от резонанса.

II. Приборы.

1. *Осциллирующий шарик* O (диаметр = 30 мм) приводился в движение электродвигателем E , как то показано на рис. 21. Он находился на 8 см под поверхностью воды

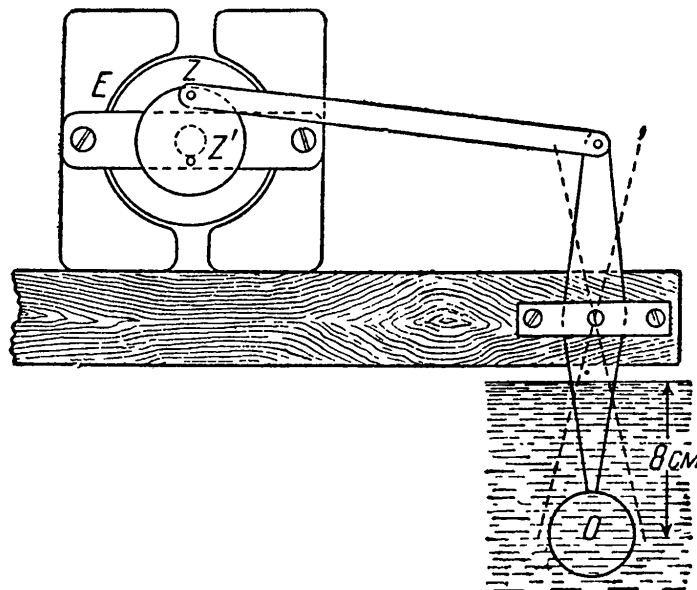


Рис. 21.

и в зависимости от расстояния пальца Z или Z' от оси вращения осциллировал с амплитудой в 23 мм или 11 мм.

2. *Регулирование скорости вращения электродвигателя*, которое обеспечивало полное постоянство периода

колебания и позволяло изменять этот период на заданные произвольно малые интервалы, достигалось применением камертона.

На рис. 22 показано расположение приборов. Мотор постоянного тока E (дававший при цепном соединении и 100 вольтах $\frac{1}{4}$ HP) присоединялся к проводам электрической станции, как шунтовая динамо; для регулирования скорости в главную цепь включалось сопротивление $r + r'$, которое подбиралось так, что число оборотов было немного менее, а при коротком замыкании части r' — несколько более того, которое требовалось.

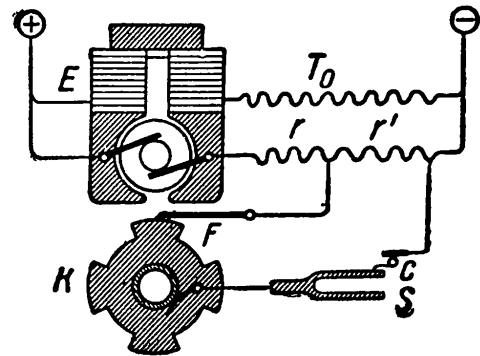


Рис. 22.

Цепь короткого замыкания в двух местах периодически замыкалась и размыкалась: первый контакт C составлял камертон S , приводимый в движение электромагнитом, а второй состоял из стальной пружины F , которая прижималась к укрепленному на оси мотора кресту K (для ясности чертежа на рис. 22 крест K изображён внизу отдельно от мотора). Когда установится требуемое число оборотов (причём число оборотов мотора ровно в четыре раза меньше числа колебаний регулирующего камертона), происходит следующий процесс: прежде всего пружина F устанавливает контакт и скользит некоторое время по зубцу креста, пока камертон S не замкнёт коротко сопротивления r' ; тогда мотор начинает работать при большей силе тока, но только до тех пор, пока пружина F не сойдёт с зубца и не прервёт цепь короткого замыкания; после этого камертон размыкает цепь, в которой уже нет тока¹⁾, и процесс начинается заново.

¹⁾ Обращаю внимание на то, что при выбранном расположении камертон замыкает довольно значительный ток, но не прерывает его, почему контакт C (платина) не портится и не вызывает изменений хода камертона.

Если каким бы то ни было образом нагрузка мотора изменится, например, уменьшится, то ход мотора ускорится, в то время как ход камертона останется без изменений, пружина коснётся зубца раньше, но и раньше сойдёт с него — промежуток времени, в течение которого ток течёт в цепи короткого замыкания, будет меньше, и соответственно начнёт убавляться мощность мотора до тех пор, пока число оборотов не сделается постоянным и равно в четыре раза меньшим, чем число колебаний камертона; ясно, что мотор регулируется смещением фазы по отношению к камертону.

В качестве постоянной нагрузки для мотора служила маленькая динамомашинка, замкнутая через соответственно выбранное сопротивление, что оказалось весьма удобным¹⁾.

Постоянство числа оборотов мотора можно было контролировать как акустическим путём — по унисону камертона с тоном пружины F , так и стробоскопическим путём — при помощи визирования искры размыкания на кресте K , отражённой в зеркале камертона²⁾.

Если слегка затормозить мотор пальцем и потом отпустить, то в течение короткого промежутка времени угловая скорость колеблется около постоянной величины, что сразу заметно по колебанию высоты тона и по движению изображения искры. Если не влиять на ход мотора нарочно, то угловая скорость часами остаётся постоянной.

Период колебания шарика изменялся тем, что ножки камертона нагружались передвижными грузами, и соответственно регулировалось сопротивление $r + r'$. Для измерения времени колебания к мотору присоединялся счётчик оборотов, а при помощи секундомера определялось время, в течение которого мотор совершал определённое число оборотов.

3. *Резонатор*, с которым были сделаны главные опыты, состоял (рис. 23) из алюминиевого шарика M ($D = 30$ мм),

¹⁾ Если мотор не нагружать, то сильно сказывается чрезвычайная изменчивость малых сопротивлений трения, и тогда почти невозможно достигнуть правильного хода.

²⁾ Камертон ($N = 64$, приблизительно) был от Дюбоска в Париже и был сконструирован для фигур Лиссажу.

укрепленного на конце плоской стальной пружины F (ширина $b=2,1$ мм, толщина $d=0,75$ мм, свободная длина $l=28$ мм); другой конец был укреплен в показанной на чертеже клемме, при помощи которой резонатор привинчивается к описанному ниже крутильному прибору.

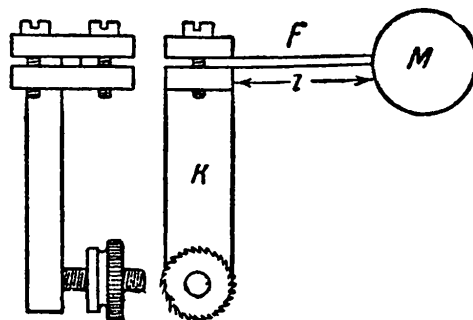


Рис. 23.

Для того чтобы проверить полученные результаты, были сделаны опыты также с другим резонатором, шарик которого был медный ($D'=15$ мм), а плоская стальная пружина была шире ($b'=11$ мм, $d'=0,5$ мм, $l'=37$ мм); этот резонатор укреплялся при помощи той же клеммы.

4. *Компенсирующее тело*, которое соответствовало по размерам резонатору, состояло из пробкового шарика, поверхность которого была покрыта гладким слоем сургуча; этот шарик укреплялся на гораздо более жесткой (менее гибкой) пружине; он привинчивался к крутильному прибору при помощи такой же клеммы, как и резонатор.

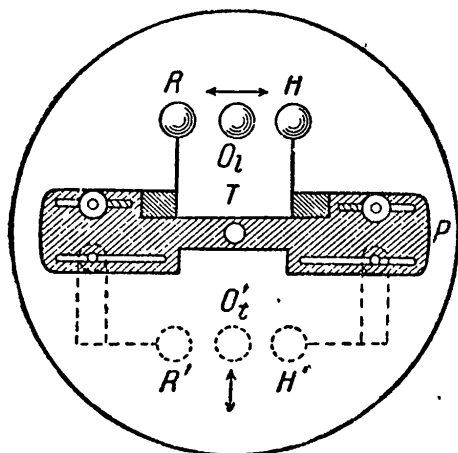


Рис. 24.

5. *Крутильный прибор*, при помощи которого определялась разница действия осциллирующего шарика на резонатор и на компенсирующее его тело, был устроен так, чтобы допускать исследование как продольных, так и поперечных колебаний; он состоял (рис. 24) из медной пластинки P , которая помощью вертикального стержня T подвешивалась к крутильной проволоке; пластинка эта весила 370 г и имела 278 мм длины — её момент инерции был достаточно велик, чтобы давать прикрепленному к ней резонатору достаточно неподвижную точку опоры. Из рис. 24

Рис. 24

(вид сверху) видно расположение осциллирующего шарика O_1 и O'_1 и соответствующее укрепление резонатора R и R' , а также компенсирующего тела H и H' для исследования продольных колебаний в первом и поперечных колебаний во втором случае. Для того чтобы стержень T удерживать в вертикальном положении и при односторонней нагрузке пластинки P , к верхней части этого стержня T (выше уровня воды) была приделана горизонтальная стрелка (на рис. 24 она не показана), к которой прикреплялся соответствующий противовес; при вращении прибора стрелка могла двигаться только в очень узком интервале вблизи нулевого положения, удерживаемая с той и с другой стороны арретирами: такое приспособление необходимо, так как иначе при недосмотре действующие силы могли бы слишком сильно вывести весь прибор из первоначального положения, и осциллирующий шарик мог бы бить по шарiku резонатора или по шарiku компенсирующего тела.

Описанное выше расположение позволяло пользоваться тем же самым резонатором как для исследования продольных, так и поперечных колебаний, причём плечи, на которые действуют крутящие силы, в обоих случаях равны.

Крутильная проволока была *стальная* ($d = 0,38$ мм, $l = 44$ см); время половины полного качания системы 8—10 сек.

Головка крутильного приспособления была разделена на целые градусы и снабжена нониусами.

6. *Водяная ванна* представляла собой металлический цилиндр в 40 см диаметра и 60 см высоты.

III. Опыты.

Приступая к измерениям тех сил, которые возникают благодаря принуждённому колебанию резонатора, необходимо предварительно убедиться, что как шарик резонатора, так и шарик компенсирующего тела установлены симметрично относительно осциллирующего шарика и что, следовательно, силы, не зависящие от движения резонатора, компенсированы; заставляя электродвигатель делать произвольное, достаточно большое число оборотов, при котором явления, обусловлен-

ные резонансом, всегда слабо выражены, обыкновенно наблюдались небольшая крутящая сила, действующая в ту или в другую сторону и обусловленная незначительной случайной асимметрией в расположении крутильного прибора по отношению к осциллирующему шарикку; изменяя (поправляя) *нулевое положение* нашей системы, легко достигнуть того, чтобы эта сила делалась практически незаметной и, следовательно, не могла оказывать влияния на дальнейшие измерения.

Отдельные наблюдения производились следующим образом: после того как грузы электромагнитного камертона (см. II,2) установлены так, чтобы скорость электродвигателя получила желаемую величину, двигатель пущен в ход и скорость его установилась, производились наблюдения как числа его оборотов в минуту (при помощи хронометра), так и величины крутящих сил, действующих на проволоку крутильного прибора. Это последнее наблюдение производилось таким образом, что проволока закручивалась на некоторый угол, стрелка крутильного прибора (см. II,5) подвигалась к «нулевому положению» между двумя арретирами и затем предоставлялась самой себе: если угол закручивания соответствовал действующим силам, то стрелка некоторое время удерживалась в равновесии (неустойчивом) около «нулевого положения» и затем, под влиянием случайных неправильностей, отклонялась в ту или другую сторону, тотчас же упираясь в арретир; при некотором навыке и при не слишком сильном движении резонатора легко было определить угол закручивания с точностью до нескольких долей градуса.

Все наблюдения, которые я производил при различных расположениях опыта, указывают, что зависимость пондеромоторного действия от резонанса *во всех случаях одинакова*; вот почему дальше я привожу только две серии наблюдений (для продольных и поперечных колебаний) с резонатором, сделанным из алюминия.

В помещённых ниже таблицах мною приведены наблюдения, которые были сделаны попеременно для амплитуд осциллирующего шарика $a_1 = 23$ мм и $a_2 = 11$ мм (см. II, 1). N обозначает номер наблюдений, n — число полных колебаний шарика в одну минуту, θ° — величину угла поворота

головки крутильных весов; $+$ обозначает *притяжение* резонатора осциллирующим шариком, а знак $-$ — *отталкивание*.

Рис. 25 и 26 графически представляют результаты таблиц III и IV; по оси абсцисс отнесены числа колебаний

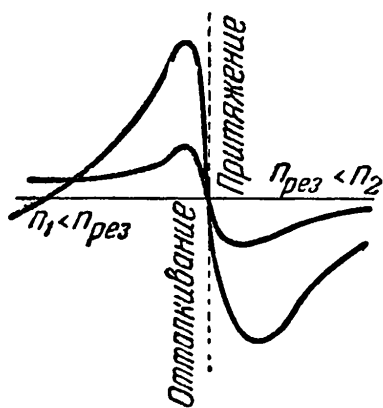


Рис. 25.

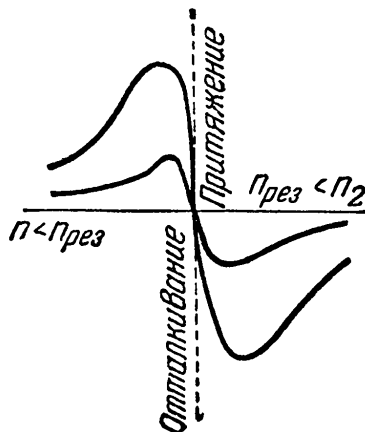


Рис. 26.

n осциллирующего шарика, а по оси ординат — величины ponderomotorных сил по измерениям на крутильных весах.

Таблица III.

Продольные колебания. (Расстояние центров шариков резонатора и компенсирующего тела $\Delta = 11$ см.)

$\alpha_1 = 23$ мм			$\alpha_2 = 11$ мм		
N	n	Θ_1°	N	n	Θ_2°
22	807	- 1,0	21	808	+ 0,8
1	827	+ 2,8	18	836	+ 1,2
3	844	+ 9,3	20	845	+ 1,8
2	852	+ 16,5	19	858	+ 2,5
4	870	+ 29,0	13	857	+ 7,0
—	—	—	11	873	+ 5,8
10	880	- 20,5	14	881	- 8,7
8	881	См. прим.	—	—	—
7	894	- 25,0	12	893	- 6,9
—	—	—	17	901	- 5,3
6	916	- 10,5	15	915	- 4,4
5	950	- 4,5	16	951	- 2,2
23	1008	- 0,5	24	1008	- 1,2

Примечание. Амплитуда резонатора чрезмерно велика; установки неопределённые.

Таблица IV.

Поперечные колебания. (Расстояние центров шариков резонатора и компенсирующего тела $\Delta = 8$ см.)

$\alpha_1 = 23$ мм			$\alpha_2 = 11$ мм		
N	n	Θ_1°	N	n	Θ_2°
19	814	+20,7	18	812	+3,9
1	829	+29,3	—	—	—
21	851	+80,0	17	857	+18,7
2	858	+77,5	10	865	+30,5
7	873	См. прим.	15	873	+14,7
—	—	—	8	875	+4,8
6	880	-26,8	14	879	-16,8
—	—	—	11	884	-22,0
5	897	-56,3	9	893	-17,0
4	917	-33,3	12	913	-9,0
3	953	-17,2	13	948	-4,5
20	1007	-7,3	22	1007	-2,1

Примечание. Амплитуда резонатора чрезмерно велика; установки неопределённые.

Результаты вышеприведённых наблюдений можно формулировать таким образом:

1. *Законы пондеромоторного действия осциллирующего шарика на соответствующий резонатор тождественны как для продольных, так и для поперечных колебаний.*

2. *Когда резонатор выше настроен, то наблюдается притяжение; когда он настроен ниже, то отталкивание.*

3. *Наибольшие величины этих противоположных пондеромоторных сил имеют место в непосредственной близости резонанса и непрерывно переходят друг в друга.*

Сравнивая эти законы с законами, найденными для электромагнитных волн, мы убеждаемся, что эти законы представляют собой тождество: если бы мы в наших опытах с электромагнитными волнами расположили приборы

так, чтобы наблюдать не вращение резонатора, а его притяжение или отталкивание вибратором, то, конечно, мы нашли бы те самые силы притяжения и отталкивания, которые нами наблюдались для гидродинамических колебаний.

Интересной особенностью найденного нами тождества, т. е. *прямой* аналогии между явлениями электрических и гидродинамических *колебаний*, является то обстоятельство, что механические действия друг на друга двух независимых гидродинамических колебаний представляют собой, как то особенно подчеркнул К. А. Бьеркнес¹⁾, *обратную аналогию* с пондеромоторными взаимодействиями электрических и магнитных масс.

IV. Наблюдение движения резонатора.

После того как законы действия осциллирующего шарика на резонатор были установлены, я попробовал свести наблюдаемые здесь явления к тем основным явлениям притяжения и отталкивания, которые были установлены Бьеркнесом для двух независимо двигающихся шариков. Для этого являлось необходимым подробно проследить одновременно движение осциллирующего шарика и шарика резонатора, чтобы определить разницу фаз их колебаний.

Эти наблюдения пришлось делать стробоскопическим методом: электродвигатель, который сообщал движение шарика, одновременно вращал при помощи бесконечного шнура независимую ось с угловой скоростью, на одну шестидесятую долю меньшей по сравнению со скоростью оси двигателя; на этой независимой оси был укреплен круг с прорезом, в который можно было наблюдать как осциллирующий шарик, так и шарик резонатора²⁾, причём кажущаяся скорость их движения была в шестьдесят раз медленнее действительной (приблизительно одно колебание в 4 секунды); наблюдение разницы фаз, не зависящей от

¹⁾ C. A. B j e r k n e s, Rep. für reine und angewandte Mathematik von L. Königsberger und G. Zeuner 1, 264 (Leipzig, 1877); Exner's Rep. 19, 288 (1883).

²⁾ Крутильный прибор при этих опытах закреплялся неподвижно.

стробоскопического замедления колебаний, при таком медленном движении не представляет уже никаких затруднений.

Для последующих соображений было достаточно установить только знак разницы фаз, а не абсолютную её величину (для точных измерений более соответствовал бы надлежащим образом изменённый метод Лиссажу), почему можно было ограничиться наблюдениями при трёх различных скоростях колеблющегося шарика: при полном резонансе и при отступлении от него приблизительно на 20%

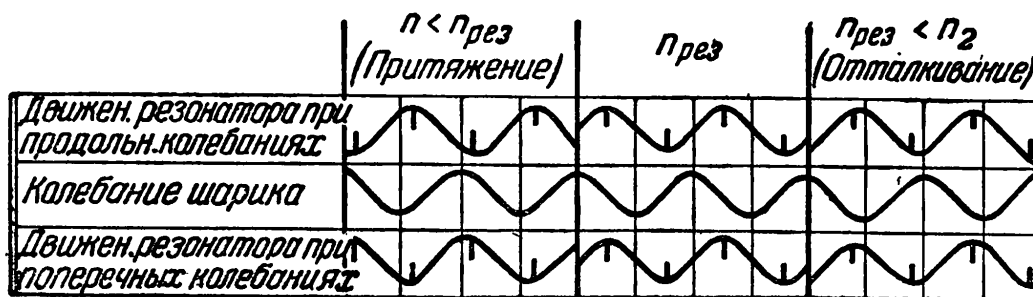


Рис. 27.

в ту и другую сторону, причём моменты последовательного перехода через максимальное отклонение как осциллирующего шарика, так и шарика резонатора заносились графически. Рис. 27 представляет собой полученные результаты как для продольных, так и для поперечных колебаний; абсциссы дают время, а ординаты — положение шариков.

При этих наблюдениях смещения фазы скорость мотора регулировалась вместо камертона таким же центробежным регулятором¹⁾, как в фонографе Эдисона. Этот регулятор и давал короткое замыкание сопротивления r' (рис. 22); такое регулирование имеет преимущество в том, что оно допускает непрерывное изменение числа оборотов во время хода (передвижением контактной пружины), вследствие чего является возможность непрерывно проследить в непосредственной близости резонанса ход амплитуд и фазы; при

¹⁾ Этот регулятор был связан с осью мотора помощью бесконечного шнура; при непосредственной связи регулировка была неудовлетворительна.

этом выступает с особенной ясностью, что смещение фазы очень скоро достигает предельных значений.

Результаты этих наблюдений можно формулировать таким образом.

Для продольных колебаний.

а) Когда резонатор настроен *выше*, фаза почти *обратная* по сравнению с фазой движения осциллирующего шарика.

б) Когда резонатор *ниже* настроен, то фаза почти *одинаковая*.

в) При переходе через резонанс разница фаз в четверть периода.

Для поперечных колебаний.

а) Когда резонатор настроен *выше*, то фаза почти *одинаковая* с фазой движения осциллирующего шарика.

б) Когда резонатор настроен *ниже*, то фазы почти *противоположны*.

в) При переходе через резонанс разница фаз в четверть периода.

Исследуя механическое взаимодействие двух *независимо* осциллирующих шариков, Бьеркнес¹⁾ нашёл для колебаний продольных и для поперечных по отношению к линии их соединения разные законы.

Для продольных колебаний.

а) Шарика притягиваются, когда движения их направлены в разные стороны.

б) Они отталкиваются, когда движения их совпадают.

Для поперечных колебаний.

а) Шарика притягиваются, когда движения их совпадают.

б) Они отталкиваются, когда движения их противоположны.

¹⁾ С. А. В j e r k n e s, Exner's Rep. 19, 298—299 (1883).

Чтобы объяснить те пондеромоторные силы, которые мы наблюдали в случае резонатора, нам необходимо сделать допущение, что гидродинамические силы Бьеркнеса действуют на шарик резонатора совершенно так же, как они действовали бы на него, если бы движения, им совершаемые, были совершенно независимы от колебания осциллирующего шарика.

V. Теория пондеромоторного действия волн на гидродинамические резонаторы.

Вышеописанные явления можно рассматривать как частное проявление тех гидродинамических сил, тщательное изучение которых было уже начато в 1863 году К. А. Бьеркнесом; мы получим полную картину явления, если предположим, что шарик резонатора двигается по закону упругих принуждённых колебаний, и приложим к этому случаю известные выражения, которые имеют место для пондеромоторного действия осциллирующего шарика на второй независимо осциллирующий шарик.

В нижеследующем мы сделаем вычисления для простейшего случая, когда расстояние шаров друг от друга велико по сравнению с их радиусами и амплитудами, и жидкость неограничена, в бесконечности неподвижна, несжимаема, не обладает трением и не содержит вихрей; мы будем рассматривать здесь только те силы, которые обусловлены резонансом¹⁾.

Мы рассмотрим сначала движение жидкости, вызываемое осциллирующим шаром, далее перейдём к рассмотрению, как действует эта жидкость на помещённый в неё шарик упругого маятника и какое движение последнего она вызывает, и, наконец, применим найденные К. А. Бьеркнесом законы пондеромоторного взаимодействия двух шаров к случаю одновременного движения осциллирующего и резонирующего шариков.

¹⁾ В наших измерениях остальные силы исключены благодаря присутствию компенсирующего тела.

Если шарик (радиуса R) движется в данной жидкости с постоянной скоростью S'_0 в направлении оси x , то потенциал скоростей Φ в окружающей жидкости имеет значение ¹⁾:

$$\Phi = S'_0 R^3 \frac{\partial \left(\frac{1}{r} \right)}{\partial x} = S'_0 \frac{R^3 \cos \Theta}{2 r^2},$$

где r — радиус-вектор и Θ — полярный угол.

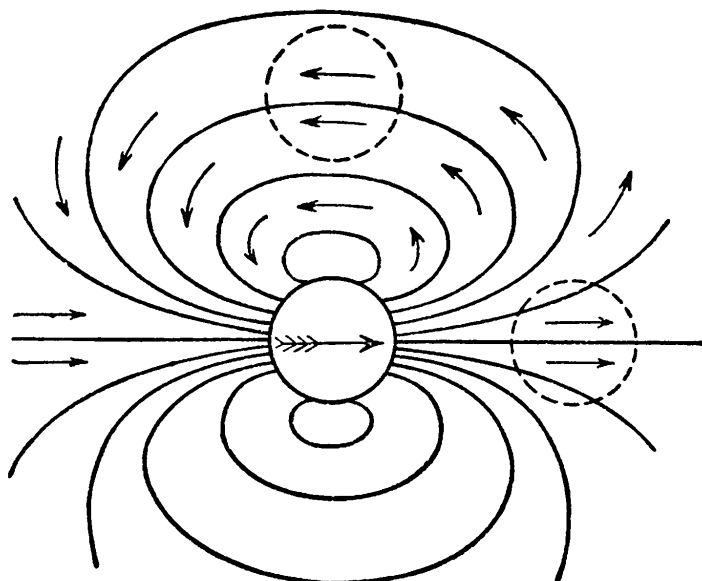


Рис. 28.

Слагающие v и w скорости движения жидкости во всякой плоскости меридиана могут быть представлены:

$$v = \frac{d\Phi}{rd\Theta} = S'_0 \frac{R^3}{2} \frac{1}{r^3} \sin \Theta,$$

$$w = \frac{d\Phi}{dr} = S'_0 R^3 \frac{1}{r^3} \cos \Theta.$$

Течение жидкости изображено на рис. 28.

Приведённые выражения изображают течение жидкости для каждого данного момента времени; они приложимы

¹⁾ G. Kirchhoff, *Mechanik*, стр. 225, уравнение (27) (Leipzig, 1883).

также и в случае неравномерно движущегося (например осциллирующего) шарика, так как все линии течения оканчиваются на поверхности шара, и заданное здесь перемещение однозначно определяет движение жидкости.

Определим скорость движения жидкости для данного расстояния r от центра шара как в направлении полярны (т. е. для продольных смещений), так и в направлении, перпендикулярном к экваториальной плоскости (т. е. для поперечных смещений):

$$v_t = 0; \quad \omega_t = S'_0 \left(\frac{R}{r}\right)^3;$$

$$v_t = \frac{S'_0}{2} \left(\frac{R}{r}\right)^3; \quad \omega_t = 0.$$

Как видно из рис. 28, обе скорости параллельны, но направлены в противоположные стороны.

Положим, что наш осциллирующий шарик совершает незатухающие синусоидальные колебания:

$$S'_0 = \mathfrak{S}'_0 \sin at. \tag{A}$$

Здесь \mathfrak{S}'_0 пропорционально максимальной скорости, a — числу колебаний; тогда движение жидкости для двух главных положений представится:

$$\left. \begin{aligned} \mathfrak{S}'_t &= + \mathfrak{S}'_0 \left(\frac{R}{r}\right)^3, \\ \mathfrak{S}'_t &= - \frac{\mathfrak{S}'_0}{2} \left(\frac{R}{r}\right)^3. \end{aligned} \right\} \tag{A'}$$

Если осциллирующая жидкость имеет скорость $S' = \mathfrak{S}' \sin at$, и если в такой жидкости находится шарик упругого маятника, то этот шарик будет находиться под действием периодических сил $f(t)$, которые зависят *только* от ускорения жидкости и величина которых есть функция диаметра шара и плотности жидкости, в нашем случае — некоторая постоянная C_1 :

$$f(t) = C_1 \frac{dS'_0}{dt} = A \cos at. \tag{B}$$

Под действием этой периодической силы шарик приходит в состояние колебательного движения, которое, как известно, можно представить как сложное, состоящее из принуждённого колебания и свободного собственного. Мы предположим, что собственные колебания слабо затухают¹⁾ и через некоторое время исчезнут; тогда установится конечное стационарное состояние, и надо принимать в расчёт только принуждённое колебание.

Скорость S'_r шарика резонатора может быть тогда представлена в виде:

$$S'_r = C_2 S' \cos(at + a'). \quad (C)$$

Величина C_2 — постоянная, зависящая как от диаметра шарика и его массы, так и от плотности жидкости.

Если отвлечься от постоянных факторов, входящие в (C) величины имеют значения²⁾:

$$\left. \begin{aligned} S'_r &= \frac{\mathfrak{S}'_0 a^2}{\sqrt{(b^2 + \beta^2 - a^2)^2 + 4a^2\beta^2}}, \\ \text{и далее, принимая во внимание (A')}: \\ S'_{rt} &= + \frac{\mathfrak{S}'_0 a^2}{\sqrt{(b^2 + \beta^2 - a^2)^2 + 4a^2\beta^2}}, \\ S'_{rt} &= - \frac{1/2 \mathfrak{S}'_0 a^2}{\sqrt{(b^2 + \beta^2 - a^2)^2 + 4a^2\beta^2}}, \\ a' &= \text{arctg} \frac{b^2 + \beta^2 - a^2}{2a\beta}, \end{aligned} \right\} \quad (C')$$

где b пропорционально числу колебаний собственного тона резонатора, а β пропорционально его затуханию.

¹⁾ Предположение полного отсутствия затухания приводит к несообразностям при полном резонансе (бесконечная амплитуда). Причина затухания, которое в наших опытах зависело отчасти от внутреннего трения жидкости, может быть обусловлено в жидкости без трения рядом побочных причин: несовершенной упругостью пружины, токами Фуко в металлических шариках и т. п.

²⁾ См., например, мою работу Wied. Ann. 52, 635 (1894), или выше стр. 108.

Из (С') следует, что для $b^2 + \beta^2 = a^2$; т. е. при полном резонансе, амплитуда колебания достигает максимума, причём фазы движения отличаются друг от друга на $\frac{\pi}{2}$.

Если резонатор настроен выше возбуждающего колебания ($b > a$), то a' положительно, и фазы движения стремятся стать противоположными для продольных и одинаковыми для поперечных колебаний; если резонатор настроен ниже, то происходит обратное явление.

Эти результаты вполне согласны с наблюдаемыми явлениями (см. отд. IV).

К. А. Бьеркнес¹⁾ вычислил притягательную силу, имеющую место в любой момент времени для случая пондеромоторного взаимодействия двух осциллирующих шариков, радиусы которых равны соответственно R_0 и R_r и которые находятся друг от друга на расстоянии r_{0r} . Если скорости шаров равны соответственно s'_0 и s'_r , то сила p может быть представлена²⁾:

$$p = \frac{\pi R_0^3 s'_0 R_r^3 s'_r}{r_{0r}^4} [\cos(s'_0, s'_r) + 3 \cos(s'_0, r_{0r}) \cos(s'_r, r_{0r})].$$

Для двух частных случаев параллельных колебаний, продольных и поперечных, это выражение, изображающее притягательную силу, принимает вид:

$$\left. \begin{aligned} K_l &= - 2s'_0 s'_r \frac{\pi R_0^3 R_r^3}{r_{0r}^4}; \\ K_t &= + s'_0 s'_r \frac{\pi R_0^3 R_r^3}{r_{0r}^4}. \end{aligned} \right\} \quad (D)$$

Предположим, что эти выражения остаются в силе также и в том случае, когда s'_r — движение принуждённое; тогда импульс притягательной силы $K dt$, с которой осцил-

1) С. А. B j e r k n e s, Repertorium der reinen und angewandten Mathematik von L. Königsberger und G. Zeuner 1, 264 (Leipzig, 1877).

2) Там же, стр. 265, 270.

лирующий шарик действует на шарик резонатора, может быть представлен на основании (A), (A'), (B), (C), (C') и (D), если мы отвлечёмся от постоянных факторов:

$$K_t dt = - 2\mathfrak{E}'_0 \sin at \frac{\mathfrak{E}'_0 a^2}{\sqrt{(b^2 + \beta^2 - a^2)^2 + 4a^2\beta^2}} \cos (at + a');$$

$$K_t dt = - \frac{1}{2} \mathfrak{E}'_0 \sin at \frac{\mathfrak{E}'_0 a^2}{\sqrt{(b^2 + \beta^2 - a^2)^2 + 4a^2\beta^2}} \cos (at + a').$$

Эти выражения показывают, что, за исключением фактора 4, пондеромоторные силы зависят от резонанса *совершенно одинаково* как для продольных, так и для поперечных колебаний, что и согласуется с приведёнными (см. отд. III) наблюдениями.

Поэтому можно вести дальнейшее вычисление для этих двух случаев одновременно:

$$K dt = - \frac{\mathfrak{E}'_0{}^2 a^2}{\sqrt{(b^2 + \beta^2 - a^2)^2 + 4a^2\beta^2}} \sin at \cos (at + a'). \quad (E)$$

Для вычисления среднего значения притягательной силы K можно распространить интеграл на большой промежуток времени, кратный периоду колебания; тогда

$$\begin{aligned} \bar{K} &= - \frac{\mathfrak{E}'_0{}^2 a^2}{\sqrt{(b^2 + \beta^2 - a^2)^2 + 4a^2\beta^2}} \frac{1}{T} \int_0^T \sin at \cos (at + a') dt = \\ &= + \frac{1}{2} \frac{\mathfrak{E}'_0{}^2 a^2 \sin a'}{\sqrt{(b^2 + \beta^2 - a^2)^2 + 4a^2\beta^2}}, \end{aligned}$$

а подставляя значение постоянной a' из (C') и опуская $\frac{1}{2}$,

$$K = + \mathfrak{E}'_0{}^2 \frac{a^2 (b^2 + \beta^2 - a^2)}{(b^2 + \beta^2 - a^2)^2 + 4a^2\beta^2}.$$

Ясно, что притягательная сила прямо пропорциональна энергии E колеблющегося шара или окружающей его жидкости. Найденное выражение можно упростить для случая непосредственной близости резонанса и для малых

значений β до тех пор, пока $(b^2 + \beta^2 - a^2)$ можно заменять через $2a(b - a)$, а также и для случая, когда мы отвлечемся от области резонанса.

В этих случаях притягательные силы:

$$K_R = E \frac{a(b - a)}{\beta^2 + (b - a)^2}; \quad (I)$$

$$K_r = E \frac{2}{\left(\frac{b}{a}\right)^2 - 1}. \quad (II)$$

Рис. 29 иллюстрирует зависимость сил, действующих на резонатор, в том случае, когда период резонатора остаётся неизменным, а период осциллирующего шарика изменяется при постоянной амплитуде (т. е. когда его максимальная скорость и вместе с этим энергия возрастает как a^2 , что имело место в наших опытах). На рис. 29 ординаты пропорциональны силам, абсциссы — числам колебаний n осциллирующего шарика. Чертёж охватывает область $(b - a) = \pm 10\beta$; так как β по предположению мало, то и возрастание энергии E в этом интервале очень мало, и поэтому кривая симметрична по отношению к области полного резонанса.

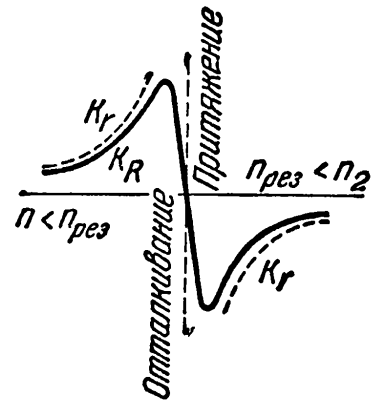


Рис. 29.

Результат можно выразить следующим образом:

1. Пондеромоторное действие возбуждающего колебания на резонатор прямо пропорционально падающей энергии и зависит только от отношения чисел колебаний, а не от их абсолютных величин.

2. Когда резонатор настроен выше, наблюдается притяжение; когда он настроен ниже — отталкивание; наибольшие величины этих противоположных пондеромоторных сил имеют место в непосредственной близости резонанса и непрерывно переходят друг в друга. Это имеет место как для продольных, так и для поперечных колебаний.

3. Наибольшие значения пондеромоторных сил при прочих равных условиях обратно пропорциональны β .

При выполнении точного вычисления действующих сил для случая, исследованного нами на опыте, мы встречаемся с чрезвычайными трудностями чисто аналитического характера. Приведённый расчёт простейшего случая, при котором принимались во внимание только существенные черты явления, даёт нам ход изменения пондеромоторных сил, который в общих чертах правильно передаёт наблюдаемые закономерности¹⁾.

VI. Заключение.

Если резюмировать все полученные результаты, то мы видим следующее:

1. Закон, по которому шарик, осциллирующий в жидкости, действует пондеромоторно на резонатор, может быть выведен из опытов и показывает одинаковый ход как при продольных, так и при поперечных колебаниях.

2. Наблюдённые явления находят вполне естественное объяснение, если только сделать допущение, что и в случае принуждённого движения сохраняют силу те же законы, которые были найдены К. А. Бьеркнесом для шаров, колеблющихся независимо.

Здесь особо нужно указать на то, что эти законы, найденные для *гидродинамических резонаторов, тождественны* с теми законами, которые я ранее нашёл для резонаторов электромагнитных, в то время как К. А. Бьеркнес²⁾ доказал, для независимых гидродинамических движений, существование *обратной* аналогии с электрическими и магнитными действиями на расстоянии.

¹⁾ Н. Е. Жуковский (Труды Отд. физич. наук Общества любителей естествознания, т. 8, вып. 2, стр. 25, 1896 г.), указывая на мои исследования (Wied. Ann. 59, 131 (1896)), дал гораздо более простой и общий вывод найденных мною законов, чем тот, который был предложен мною.

²⁾ С. А. Bjerknæs, Rep. für Math., цит. выше, стр. 271; Exper's Rep. 19, 288 (1883).

ГЛАВА III.

АКУСТИЧЕСКИЕ РЕЗОНАТОРЫ.

Закончив исследование электромагнитных и гидродинамических колебаний, я обратился к изучению пондеромоторных действий звуковых колебаний на соответствующие им резонаторы. Подобные исследования были сделаны раньше Дворжаком, который получил в этом направлении ряд интересных и ценных результатов; но наблюдения, им сделанные, лишь устанавливают самый факт пондеромоторного действия волн на резонаторы, не давая возможности вывести какие-либо резко выраженные законы его, так как во всех этих наблюдениях одновременно действовал ряд отличных друг от друга по своему происхождению пондеромоторных сил, управляемых разными законами; только расчлняя эти силы, изучая каждую из них в отдельности, мне удалось найти простые законы, ими управляющие.

Оставляя в стороне те весьма сложные случаи, когда резонатор находится в непосредственном соседстве с источником колебаний и составляет с ним одну сопряжённую систему, мы можем те пондеромоторные силы, которые одновременно действуют на свободный резонатор, подразделить на три друг от друга независимых категории:

а) *Непосредственное действие* падающей волны на тело резонатора, как на всякое другое встречаемое волной препятствие. Величина этого действия зависит только от внешней формы резонатора и не зависит от периода его собственного колебания. Подобное действие звуковых волн было ещё раньше найдено Guuot и Schellbach'ом¹⁾ и обстоятельно изучено другими исследователями. Эти действия мы можем свести к механическим силам известной гидродинамической задачи; при очень сильных колебаниях воздуха к этим пондеромоторным действиям присоединяются механические действия образующихся в этом случае вихрей, воздушных потоков и т. д.

б) *Реакционные силы*, испытываемые всяким звучащим телом в направлении, обратном направлению излучаемой

¹⁾ См. Bertin, Ann. de Chim. et de Phys. (4) 25, 199 (1872).

волны; в случае резонатора эти силы не зависят от направления возбуждающей волны и достигают наибольших величин при полном резонансе, так как в этом случае собственное колебание резонатора будет наибольшее. Эти реакционные силы для случая открытых с одной стороны полых резонаторов были впервые обнаружены Дворжаком¹⁾ и были применены им для построения акустического «реакционного колеса»; в резонаторах, излучающих энергию симметрично в разных направлениях (как, например, в струнах, пластинках, перепонках и т. д.), эти реакционные силы могут взаимно уравновешиваться.

в) *Взаимодействие* возбуждающего и возбужденного в резонаторе колебаний также сопровождается пондеромоторными силами, к которым примешиваются указанные выше силы непосредственного действия и реакционных эффектов и в большинстве случаев до неузнаваемости изменяют картину взаимодействия этих сил; из многочисленных наблюдений Дворжака это взаимодействие яснее всего выразилось в опытах с перепонками²⁾, так как в этом случае реакционные силы, по условиям симметрии, уравновешивались, и то притяжение выше настроенных перепонки и отталкивание настроенных ниже, которое наблюдал Дворжак, мы должны приписать силам взаимодействия колебаний.

Цель моей работы была — исследовать пондеромоторные силы, обусловленные *взаимодействием возбуждающего и возбужденного колебания*, для случая открытых с одной стороны полых резонаторов (независимо от непосредственного действия волн и от реакционных сил колебаний), и выяснить зависимость исследуемых сил от резонанса.

І. Расположение опытов.

Следуя примеру Дворжака, я пользовался продольным колебанием стержней Кундта как источником звуковых волн; цилиндрическими резонаторами служили тонкостенные стек-

1) V. Dvůřak, Ber. d. Wien. Akad. 72 (II Abth.), 213 (1875); Pogg. Ann. 157, 42 (1876); Wied. Ann. 3, 328 (1878).

2) V. Dvůřak, Ber. d. Wien. Akad. 84 (II Abth.), 710 (1882).

лянные трубки, высоту собственного тона которых легко было изменять в широких пределах, передвигая пробковые доньшки их; пондеромоторные силы, действующие на резонатор, измерялись углом кручения проволоки, к которой был подвешен исследуемый резонатор.

При выборе приёма наблюдений особое внимание было обращено прежде всего на реакционные силы, которые при полном резонансе делаются особенно велики; чтобы избавиться от них, цилиндрический резонатор подвешивался к крутильной нити таким образом, что (вертикальная) ось вращения пересекала (горизонтальную) ось резонатора: реакционные силы в этом случае не могут производить вращения системы и, следовательно, не входят в результаты наблюдений.

Что касается до непосредственного действия звуковых волн на тело резонатора, то их легко обнаружить, запирая отверстие резонатора пробковым доньшком: раз определив величину этой силы, нетрудно было принимать её во внимание при обработке результатов наблюдений. Наконец, чтобы уменьшить эту постоянную силу, в ряде опытов был применён такой приём: к стержню, к которому подвешивался резонатор, была прикреплена металлическая пластинка под углом в 45° к направлению распространения звуковой волны; размеры этой пластинки подстриганием изменялись до тех пор, покуда при закрытом отверстии резонатора и возможно сильном возбуждении кундтовского стержня вся система заметно не вращалась.

Чтобы сравнивать отдельные наблюдения между собой, сила звука, даваемого кундтовским стержнем, определялась при помощи диска Рэлея или реакционными силами неизменного резонатора.

Передвигая пробковое доньшко резонатора (тем изменяя его длину, а следовательно, и период его собственного колебания), я наблюдал для каждого положения доньшка одновременно сравнительную силу звука (как указано выше) и величину действующих на резонатор сил углом кручения проволоки подвеса; приводя указанные наблюдения к некоторой постоянной силе звука, мы получаем зависимость пондеромоторных сил от длины резонатора и, делая поправку на открытый конец его, от длины волны его.

Наблюдения производились как в непосредственном соседстве источника звука, так и в значительном от него расстоянии; как источники, так и способ наблюдения их возбуждения были различны в этих двух случаях.

II. Приборы.

1а. *Кундтовский стержень*, при помощи которого были исследованы действия источника на резонатор, находящийся в его непосредственном соседстве, был расположен вот каким образом (рис. 30): стеклянная трубка S диаметром

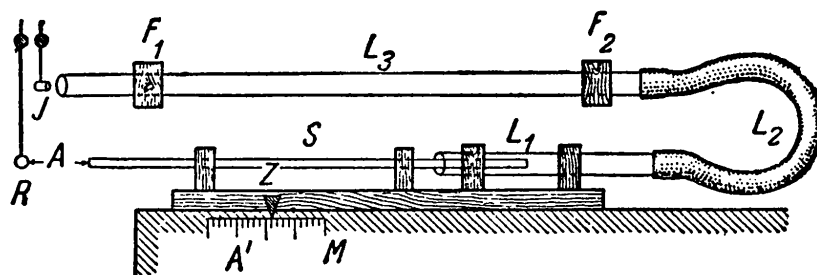


Рис. 30.

в 1 см и длиной в 150 см была на концах заткнута пробками и залита сургучом, так что концы её представляли собой звучащие кружки в 1 см диаметром; помощью двух зажимов трубка была прикреплена к деревянной доске и давала при возбуждении $\lambda = 94$ мм (в воздухе). Один конец трубки посылал волны по направлению к резонатору R , а другой действовал на индикатор (реакционный резонатор) J ; последнее достигалось тем, что звук передавался помощью стеклянной трубки L_1 и гибкой резиновой трубки L_2 стеклянной трубке L_3 , неподвижно укрепленной в зажимах F_1 и F_2 . Передвигая доску с кундтовским стержнем, можно было по желанию изменить расстояние A между источником звука и резонатором (и отсчитывать это расстояние по масштабу M), не изменяя при этом условий действия другого конца стержня на индикатор J ¹⁾.

¹⁾ Пользуясь такими длинными трубами, надо иметь в виду, что настройка и, следовательно, действие стержня на резонатор могут в сильной степени зависеть от колебаний температуры.

16. *Кундтовская трубка* (рис. 31), которая служила для возбуждения интенсивных звуковых волн, состояла из стеклянной трубки S в 155 см длины и 2,2 см диаметра, снабжённой пробковым диском и открытой стеклянной резонаторной трубкой L ; при возбуждении¹⁾ трубка давала $\lambda = 100$ мм (в воздухе). Труба L (внутренний диаметр 4,4 см) всегда

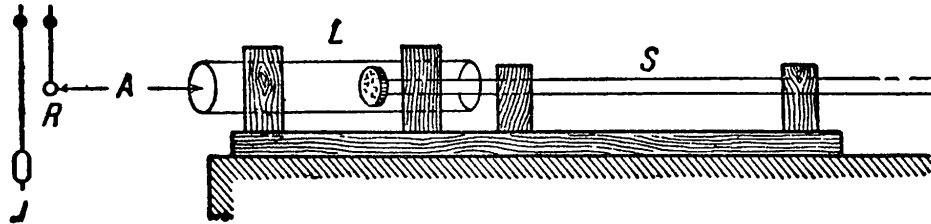


Рис. 31.

устанавливалась так, что пробковая пластинка находилась на расстоянии 2,7 или 12 см от открытого конца трубы.

2. *Резонаторы* были устроены по Дворжаку из тонкостенных стеклянных трубок (длиной в 45 мм) и имели внутренние диаметры: у резонатора I $d_1 = 8$ мм, у резонатора II $d_2 = 11$ мм. Края резонаторов были отшлифованы. Передвигая пробковое доньшко S , можно было по желанию изменять длину воздушной колонны l и легко измерять её помощью масштаба; задний конец резонатора был закрыт пробкой K . Каждый резонатор имел две пѣтли O_1 и O_2 , которые служили для подвешивания его к крутильному прибору, как то указано на рис. 32 и 33. Массивная клемма T препятствовала «сдуванию» резонатора реакционными силами.

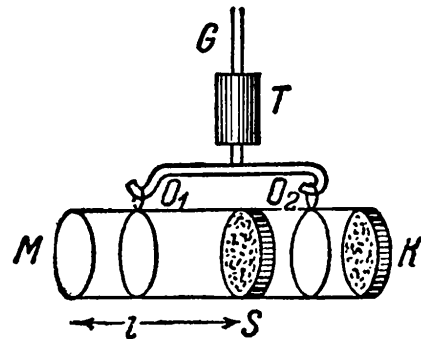


Рис. 32.

3а. *Индикатором* в опытах с кундтовским стержнем (рис. 30) служил неизменяемый резонатор, настроенный на максимальное возбуждение, прикреплѣнный к коромыслу кру-

¹⁾ Шерстяная тряпка, как обыкновенно, смачивалась чистой водой; для особенно сильного возбуждения следует брать воду с большой примесью алкоголя или чистый алкоголь.

тильного приспособления, как в опытах Дворжака¹⁾, так, чтобы реакционные силы могли вращать его; отверстием он был обращён к трубке L_3 (рис. 30), и величиной крутящих сил измерялась степень возбуждения кундтовского стержня.

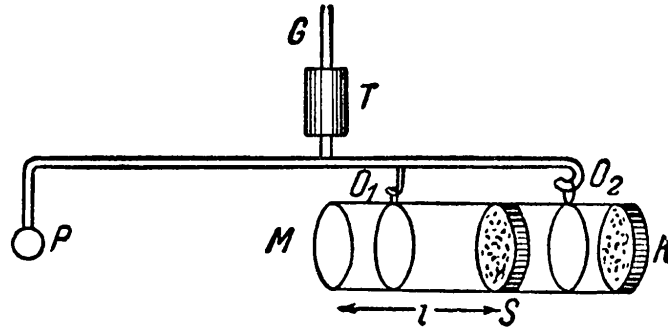


Рис. 33.

36. Диск Рэля, который служил индикатором при опытах с кундтовской трубкой (рис. 31), представлял собой цинковый кружок (рис. 34) в 0,2 мм толщиной с 50 мм диаметром; он был так прикреплен (на стеклянном стержне G) к крутильному приспособлению, что его плоскость составляла угол в 45° с плоскостью падающей на него волны²⁾.

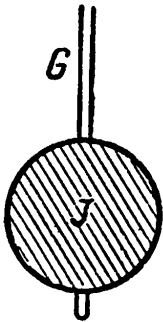


Рис. 34.

4. Крутильный прибор (рис. 35) был одинаково устроен как для индикаторов, так и для резонаторов: стеклянный стержень был подвешен к тонкой металлической проволоке (платиновой, $d_1 = 0,05$ мм, $L_1 = 2,5$ см, или серебряной, $d_2 = 0,1$ мм, $L_2 = 45$ см), причём каждый прибор имел свой успокоитель: пластинка F была погружена в сосуд D , наполненный маслом; чтобы период колебания всей системы был не особенно мал, к рамке успокоителя были прикреплены металлические массы M_1 и M_2 , благодаря которым колебания ($\tau/2 = 7$ сек. и 9 сек.) совершались достаточно медленно для удобного отсчёта точек поворота.

¹⁾ См. V. Dvóřak, Wied. Ann. 3, 333 (1878).

²⁾ Относительно применения диска Рэля к измерению интенсивности звука см. E. Grimsehl, Wied. Ann. 34, 1028 (1883).

5. *Зеркальный отсчёт* был устроен по способу, употреблённому при исследовании электромагнитных колебаний (см. гл. I, § 8, стр. 97), и позволял делать отсчёты отклонения индикатора и резонатора одновременно; приборы были расположены так, что наблюдатель удобно мог одновременно возбуждать кундтовский стержень и делать отсчёты в трубу.

Как резонатор, так и индикатор были защищены от случайных воздушных течений проволочной цилиндрической клеткой (высота 40 см, диаметр 30 см), покрытой тонким слоем ваты: звуковые волны свободно могли проходить через эти мягкие стенки без каких-либо изменений или отражений. Кундтовский стержень (рис. 30) входил внутрь этой клетки, тогда как кундтовская трубка (рис. 31) при опытах находилась вне её.

III. Опыты.

Наблюдения производились таким образом, что стержень возбуждался по возможности с одинаковой силой и всегда одинаковым способом в течение всей серии отсчётов; отклонения резонатора и индикатора отсчитывались пять раз подряд; каждое отдельное наблюдение приводилось вычислением к некоторому определённом отклонению индикатора, что не представляет затруднения, так как отношение отклонения индикатора и резонатора в широких пределах остаётся постоянным; затем из этих пяти приведённых отдельных наблюдений выводилась средняя величина.

Чтобы исследовать пондеромоторные действия в *непосредственном соседстве* источника звука, источником последнего служил кундтовский стержень (рис. 30), а резонатор был укреплён, как показано на рис. 32, и притом так ориентирован, что продолжение оси стержня было перпендику-

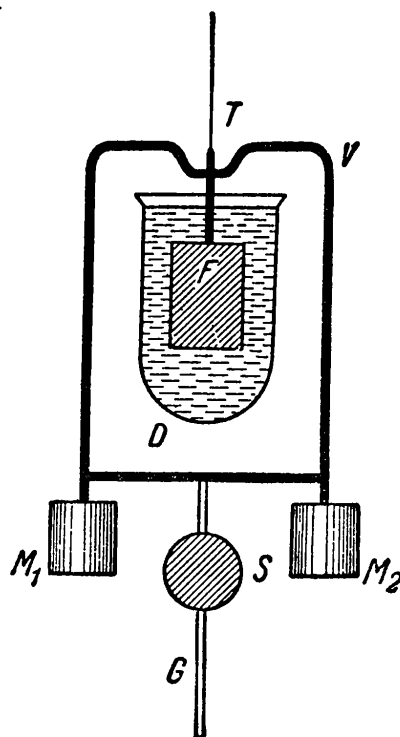


Рис. 35.

лярно оси резонатора и проходило через открытый конец его. В табл. V приведены отклонения резонатора (в делениях скалы), приведённые к постоянной силе возбуждения

Таблица V.

	$A_1 = 1 \text{ см}$		$A_2 = 2 \text{ см}$		$A_3 = 3 \text{ см}$	$A_4 = 4 \text{ см}$	$A_5 = 6 \text{ см}$	$A_6 = 10 \text{ см}$
	набл.	попр.	набл.	попр.				
$l = 5 \text{ мм}$	+ 85	0	+ 2,2	0	- 0,1	0	0	0
$l = 17 \text{ мм}$	+210	+125	+ 7,5	+ 5,3	+ 1,5	+ 0,4	+ 0,6	0,0
$l = 19 \text{ мм}$	+323	+238	+10,7	+ 8,5	+ 1,8	+ 0,5	+ 0,5	- 0,1
$l = 20 \text{ мм}$	+371	+286	+10,5	+ 8,3	+ 2,1	+ 0,5	+ 0,3	- 0,3
$l = 21 \text{ мм}$	+819	+734	- 4,5	- 6,5	- 8,4	- 7,1	- 5,0	- 1,3
$l = 22 \text{ мм}$	-400	-485	-65,0	-67,2	-22,0	-11,0	- 3,1	- 1,5
$l = 23 \text{ мм}$	-232	-317	-27,0	-29,2	- 7,6	- 3,4	- 0,9	- 0,3
$l = 24 \text{ мм}$	- 59	-144	- 9,7	-11,9	- 3,5	- 1,7	- 0,5	- 0,3
$l = 26 \text{ мм}$	+ 24	- 62	- 7,7	- 9,9	- 3,7	- 1,5	- 0,7	- 0,3

кундтовского стержня, полученные из непрерывного ряда наблюдений, в которых была изменяема как длина l воздушной колонны в резонаторе, так и расстояние A между концами кундтовского стержня и серединой отверстия резонатора; знак (+) обозначает притяжение источником, а (-) — отталкивание им.

Для расстояния $A_1 = 1 \text{ см}$ и $A_2 = 2 \text{ см}$ приведены помимо непосредственно наблюдаемых величин («набл.») ещё и поправленные («попр.») величины: при описанных опытах непосредственное действие волны на открытый конец резонатора не было исключено и давало постоянное отклонение для всех длин воздушной колонны, если она была меньше 10 мм; ввиду этого мы должны считать, что и для больших длин l отсчёты изменены на величину указанного постоянного притягательного действия источника, и мы получаем величины интересующих нас взаимодействий (с достаточной для нас степенью точности), вычитая указанную величину из наблюдаемых отсчётов. Для больших расстояний A это непосредственное действие не оказывает заметного влияния, так как оно уравнивается, равномернее распределяясь на оба конца резонатора.

Чтобы определить длину волны, соответствующую данной длине воздушной колонны в резонаторе, надо было ещё определить величину поправки на открытый конец его. Эту последнюю нетрудно найти, если взять открытую стеклянную трубку, имеющую одинаковый диаметр с трубкой резонатора, образовать в ней, при помощи того же стержня, кундтовы пыльные фигуры и измерить расстояние последнего узла от открытого конца трубки. Для употреблённой длины волны $\lambda = 94$ мм это последнее расстояние оказалось $l_r = 21,5$ мм, а следовательно, поправка на открытый конец $\delta = 2$ мм.

Характер действующих на резонатор пондеромоторных сил в непосредственной близости от источника ($A_1 = 1$ см) графически представлен на рис. 36; здесь по абсциссам отложены длины волн резонатора, а по ординатам — действующие на него пондеромоторные силы; ν обозначает длину волны источника.

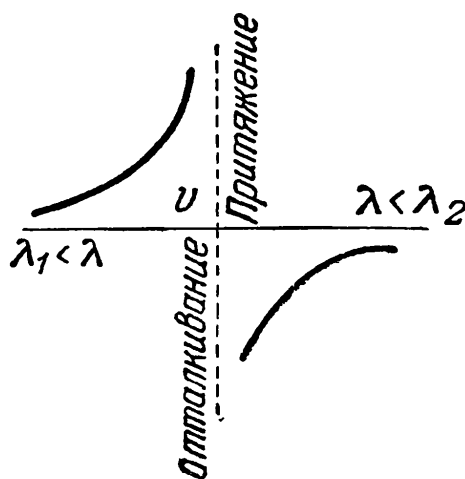


Рис. 36.

Описанные особенности мы можем выразить таким образом:

1. Резонатор, настроенный выше источника, притягивается им; он отталкивается этим последним, если настроен ниже источника.

2. Максимумы этих противоположных действий имеют место вблизи резонанса.

Тождественные законы нашёл раньше Дворжак¹⁾ для случая настроенных перепонки.

Надо заметить, что указанные законы имеют место только в непосредственной близости от источника и только

1) V. Dv o r a k, Ver. d. Wien. Akad. 84 (II Abth.), 710 (1882). Эти результаты можно, опираясь на опыты Стро (St r o h, Nature 26, 134 (1882)), свести прямо на изученную мною гидродинамическую задачу (см. выше, стр. 112 — 132).

в том случае, когда размеры источника — в наших опытах кружок в 10 мм диаметра (конец стержня) — малы сравнительно с длиной волны, а поверхность самой волны имеет значительную кривизну; экспериментируя с большими колеблющимися поверхностями, мы не находим указанных простых законов.

Постепенно увеличивая расстояние между резонатором и источником колебания, мы замечаем (см. табл. V), что силы притяжения постепенно исчезают, тогда как максимум отталкивательных сил перемещается, приближаясь к точке полного резонанса; при достаточно больших расстояниях ($A_6 = 10$ см) сил притяжения нет, остаются одни лишь отталкивательные силы, наибольшая величина которых совпадает с полным резонансом.

Чтобы исследовать пондеромоторное действие *волны*, свободно распространяющейся в пространстве, необходим весьма сильный источник звука, и таковым с успехом может служить кундтовская трубка (рис. 31). Ряд наблюдений, предпринятых при различных условиях, заставил прийти к заключению, что в этом случае мы имеем дело с двумя независимыми друг от друга силами: с одной стороны, это суть *вращающие силы*, стремящиеся ориентировать отверстие резонатора известным образом по отношению к плоскости волны, — силы, знак которых меняется при переходе через резонанс, а с другой стороны, мы имеем силы *давления волны* на отверстие резонатора, — силы, стремящиеся двигать отверстие резонатора в направлении движения волны и достигающие своего максимума при полном резонансе, следовательно, не меняющие своего знака. Я не буду приводить здесь первоначальных опытов и ограничусь лишь описанием тех приёмов, которые позволяют изучать эти силы независимо друг от друга.

Чтобы исследовать *вращающие силы*, действующие на отверстие резонатора, самый резонатор был подвешен так, как указано на рис. 33: середина отверстия совпадает с осью вращения, почему все силы давления, действующие на это отверстие, не могут произвести вращения системы и потому исключены из наблюдений. Располагая отверстие резонатора на расстоянии $A_0 = 21$ см от отверстия кунд-

товской трубки, притом так, чтобы ось резонатора составляла угол в 45° с направлением звука, и уменьшая эффект непосредственного действия звуковых колебаний на тело резонатора металлической пластинкой (в 2×3 см), укрепленной на стержне крутильного приспособления в плоскости, перпендикулярной к оси резонатора (как о том сказано выше, 1), нетрудно исследовать вращающие силы. В таблице VI приведены результаты наблюдений в делениях скалы, отнесённые к некоторому определённом возбуждению кундтовской трубки: знаком (+) обозначено такое вращение, которое стремится поставить отверстие резонатора в плоскость волны, т. е. так, чтобы возбуждение его при вращении увеличивалось, тогда как знак (—) обозначает вращение в противоположную сторону. Длина резонатора, соответствующая максимальному резонансу и определённая, как было указано выше, $l_r = 21,5$ мм.

Таблица VI.

	Наблюд.	Поправл.
$l = 5$ мм	$-1,6 \pm 0,6$	0
$l = 17$ мм	$-1,2 \pm 0,8$	+ 0,4
$l = 19$ мм	$-1,0 \pm 0,2$	+ 0,6
$l = 20$ мм	$+7,0 \pm 1,4$	+ 8,6
$l = 21$ мм	$-11,4 \pm 1,0$	+ 13,0
$l = 22$ мм	$-11,6 \pm 0,4$	- 10,0
$l = 23$ мм	$-12,8 \pm 1,2$	- 11,4
$l = 24$ мм	$-7,5 \pm 1,4$	- 6,1
$l = 27$ мм	$-2,0 \pm 1,0$	- 0,4

В таблице VI рядом с наблюдаемыми («наблюд.») средними величинами приведены также средние колебания отдельных отсчётов, для того чтобы дать возможность судить о точности подобного рода измерений. Для длины воздушной колонны резонатора $l = 5$ мм наблюдается отклонение, величина которого для всей длины менее 10 мм не зави-

сит от степени резонанса и, очевидно, обусловлена неполной компенсацией непосредственного действия волны на тело резонатора. Чтобы получить величину вращающих сил независимо от этой случайной постоянной силы, надо вычесть эту величину из данных наблюдений, и тогда мы получаем ряд поправленных («поправл.») величин в таблице.

Зависимость вращающих сил от резонанса графически изображена на рис. 37, где по абсциссам отложены длины волн резонатора (ν означает длину волны источника), а по ординатам отложены величины соответствующих вращающих сил.

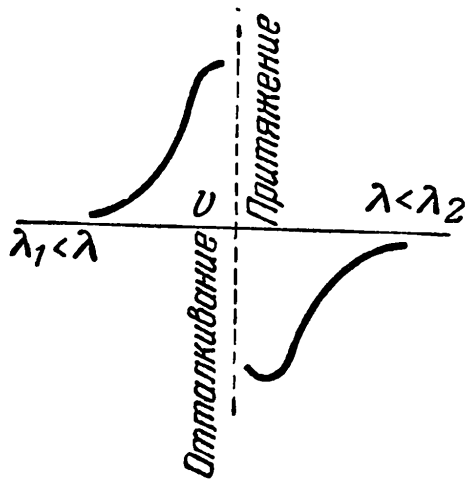


Рис. 37.

Результаты наблюдений можно выразить таким образом.

1. *Плоская волна вращает резонатор таким образом, чтобы отверстие его совпало с плоскостью волны и, следовательно, возбуждение его увеличивалось, если резонатор настроен выше, и вращает его в обратную сторону, если он настроен ниже.*

2. *Максимумы этих противоположных действий лежат вблизи резонанса.*

Силы давления плоской волны, силы, стремящиеся увести отверстие резонатора в направлении распространения звука, можно исследовать на том же резонаторе (см. рис. 33), но с той разницей, что поместить отверстие его на другом конце трубки (т. е. на расстоянии 45 мм от оси вращения). Если установить резонатор так же, как в первом случае (пользуясь и теперь пластинкой, компенсирующей непосредственное действие волны на тело резонатора), то наблюдения показывают, что при этих условиях отверстие резонатора всегда отталкивается источником колебаний и стремится двигаться в направлении распространения звука. В таблице VII приведены результаты наблюдений (в делениях шкалы).

Таблица VII.

	Наблюд.	Вращен.	Поправл.
$l=2$ мм	0	0	0
$l=17$ мм	— 14	0	— 14
$l=19$ мм	— 13	+ 0,1	— 13
$l=20$ мм	— 53	+ 0,9	— 54
$l=21$ мм	— 155	+ 1,3	— 156
$l=22$ мм	— 101	— 1,0	— 100
$l=24$ мм	— 3	— 0,6	— 2
$l=26$ мм	— 1	— 0	— 1

В таблице VII приведены кроме результатов наблюдения («наблюд.») ещё и вычисленные силы вращения («вращен.»), налагающиеся на исследуемые силы отталкивания: в настоящем случае эти силы были почти в 10 раз меньше, чем при вышеописанных опытах (табл. VI), потому что в этом случае при измерениях оказалось достаточным возбуждать кундтовскую трубку почти в 10 раз слабее (чему соответствовало и в 10 раз меньшее отклонение индикатора); в столбце «поправл.» приведены силы отталкивания, получаемые из наблюдений, если поправить эти последние на примешанные к ним небольшие силы вращения. Рис. 38 представляет зависимость этих отталкивательных сил от резонанса.

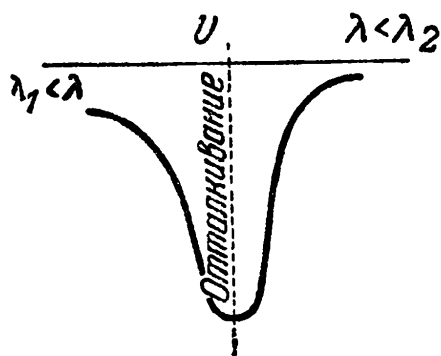


Рис. 38.

Чтобы убедиться, что наблюдаемые отталкивательные силы не появились благодаря случайному и незамеченному отступлению от симметрии в расположении резонатора и не вызваны реакционными силами его, тот же ряд наблюдений был повторен, причём для каждой длины l воздушной колонны резонатора кундтовская трубка то находилась в прежнем положении, то помещалась на том же рас-

стоянии от оси вращения, но была перенесена на 90° вокруг этой последней, т. е. находилась на 45° по другую сторону от оси резонатора. Как резонатор, так и индикатор давали в этом последнем случае отклонения на скале в противоположном направлении. Если бы существовало заметное действие реакционных сил самого резонатора, то эти силы всегда действовали бы в одном направлении и, увеличивая отклонения для одного положения трубки, они уменьшали бы их для другого — оба ряда наблюдений не сходились бы. Сколько-нибудь заметной разницы в двух таких сериях наблюдений, однако, не удалось обнаружить, и потому мы вправе утверждать, что указанное явление обуславливается действием падающей волны на отверстие резонатора.

Указанную отталкивательную силу удаётся наблюдать и в том случае, когда ось резонатора находится под прямым углом к направлению распространения звука, как то следует из табл. V, для $A_6 = 10$ см.

Наблюдённые особенности явления можно выразить таким образом.

1. *Плоская волна, падающая на резонатор, стремится увести его в направлении движения, т. е. источник звука производит отталкивание резонатора.*

2. *Это давление плоской волны на резонатор достигает максимума при полном резонансе и при переходе через него не меняет знака.*

Приведённые здесь наблюдения с достаточной ясностью показывают, что взаимодействие возбуждающей волны и возбуждённого в резонаторе колебания может быть рассматриваемо и изучаемо как ряд независимых друг от друга пондеромоторных сил, которые в общем случае налагаются друг на друга.

IV. Примечание, касающееся электромагнитных волн.

Наблюдения показывают полное сходство пондеромоторного действия акустических и электромагнитных волн на соответствующие резонаторы в непосредственной близости источника колебания. Для плоских волн законы для

акустических резонаторов отличны; так как мне не удалось поставить соответствующие опыты для электромагнитных волн, я предполагаю в нижеследующем, в соответствии с моими прежними исследованиями об электромагнитных резонаторах¹⁾ и сохраняя прежние обозначения, показать, что и в этом случае закон пондеромоторного действия изменяется таким же образом, как это вытекает из опытов с акустическими резонаторами. Рассмотрим здесь отдельно вращающие силы и силы давления плоских электромагнитных волн.

Величина *вращающей силы* и её зависимость от резонанса вытекает из вышеприведённых исследований²⁾, касающихся направления силовых линий возбуждающего поля и резонатора; эти вращающие силы подчиняются одним законам как в непосредственном соседстве с источником колебаний (случай, исследованный мной экспериментально), так и для плоских волн, именно: если резонатор настроен выше, то он будет вращаться так, что возбуждение его будет увеличиваться; если он настроен ниже, то вращение происходит в противоположном направлении. Ход явления, следовательно, *тождествен* с тем, что имеет место для акустических резонаторов.

Силы давления могут быть выведены из рассмотрения пространственного распределения поля сил вокруг резонатора и соответствующего возбуждения резонатора для каждого данного момента.

Если поляризованное тело находится в неравномерном поле, то оно будет двигаться в направлении, где соответствующая ему поляризация имеет наибольшее значение или противоположная ему — наименьшее: величина силы пропорциональна пространственному изменению силы поля и зависит от ориентировки поляризованного тела.

Состояние поляризации волн, падающих на неподвижный резонатор, как функция времени $f(t)$, выражается:

$$f(t) = a \cos at.$$

¹⁾ P. Lebedew, Wied. Ann. 52, 635 (1894); см. выше, стр. 90—112.

²⁾ Там же, стр. 636; см. выше, стр. 110.

Пространственное распределение силы поля сводится к тому, что в пределах полуволны в ту и другую сторону (по направлению падающих волн, считая от резонатора) имеются всевозможные значения напряжения поля. В направлении движения волн, т. е. для состояний, соответствующих предшествующим (отрицательным) моментам, пространственное изменение силы поля, там, где находится резонатор, для каждого данного момента пропорционально $f'(t)$:

$$f'(t) = \pm a \sin at.$$

Поляризация $\varphi(t)$, имеющая место в резонаторе, или её слагающая, параллельная возбуждающему полю, может быть представлена в случае принуждённых стационарных колебаний, которые остаются после затухания собственных колебаний, следующим образом:

$$\varphi(t) = A \sin(at \mp a').$$

Импульс dp силы, действующей в направлении распространяющихся волн, для каждого элемента времени dt :

$$dp = f'(t) \varphi(t) dt.$$

Для вычисления среднего значения силы давления p распространяем интеграл на большой промежуток времени; выполняя интегрирование и вставляя соответственные постоянные¹⁾, находим:

$$p = \frac{E a^3 \beta}{(b^2 + \beta^2 - a^2)^2 + 4a^2\beta^2}.$$

Здесь E пропорционально падающей в единицу времени на резонатор энергии, a — числу колебаний источника, b — числу колебаний резонатора и β — затуханию последнего.

Величина p всегда положительна, т. е. мы всегда имеем дело с *отталкивательным* действием источника волн, достигающим наибольшей величины при наибольшем резонансе; при прочих равных условиях отталкивательная сила в непосредственной близости резонанса обратно пропорцио-

¹⁾ P. L e b e d e w, Wied. Ann. 52, 635 (1894); см. выше, стр. 107.

нальна затуханию β , тогда как при больших отступлениях от резонанса она прямо пропорциональна этой величине. Ход изменения этой отталкивательной силы, в соответствии с предыдущими исследованиями, изображён на рис. 39 для постоянной длины волны источника колебаний и переменной длины волны резонатора; величина $\beta = 0,05a$. Представленные на рис. 39 кривые для различных затуханий β_1 , β_2 и β_3 охватывают область $(a - b) = \pm 10\beta$.

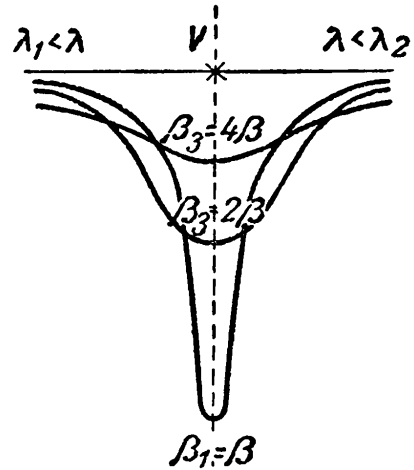


Рис. 39.

Ясно, что и в этом случае ход явления для электромагнитных резонаторов тождествен с наблюдаемыми для акустических резонаторов. Становясь на точку зрения электромагнитной теории, мы могли бы применить рассмотренные результаты к изучению отталкивательного действия солнца на кометные хвосты, на что я уже ранее указывал¹⁾; к сожалению, у нас нет необходимых для вычисления данных относительно величин b и β .

V. Заключение.

Полная тождественность в действии пондеромоторных сил, которая экспериментально обнаружена для столь различных колебательных движений, каковы колебания электромагнитные, гидродинамические и акустические, показывает, что те элементарные законы, к которым сводятся наблюденные явления, должны быть независимы от физической природы данных колебаний и воспринимающих их резонаторов. В таком случае пределы приложимости найденных законов должны быть независимы от физической природы данных колебаний и воспринимающих их резонаторов. В таком случае пределы приложимости найденных законов должны быть чрезвычайно расширены.

¹⁾ P. Lebedew, Wied. Ann. 45, 297 (1892); см. выше, стр. 60 — 65.

Главный интерес исследования пондеромоторного действия волнообразного движения лежит в принципиальной возможности распространить найденные законы на область светового и теплового испускания отдельных молекул тела и предвычислять получающиеся при этом междумолекулярные силы и их величину.

Покуда невозможно сказать, в каком направлении должны пойти дальнейшие исследования этих вопросов, чтобы достичь окончательного ответа самым коротким путём: нет никаких данных, позволяющих сказать что-либо определённое о свойствах молекул-резонаторов. Некоторые указания на то, где можно искать дороги с надеждой на успех, нам может дать только спектрально-аналитическое изучение процессов излучения.





ОПЫТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕТОВОГО ДАВЛЕНИЯ.

Развивая основные положения электромагнитной теории света, Максвелл (1873) обратил внимание и на те силы, которые являются нам в виде пондеромоторных сил во всякой магнитно- или электрически-поляризованной среде: из его теории неизбежно следует необходимость существования этих сил также во всяком пучке лучей, и Максвелл¹⁾ говорит:

«В среде, в которой распространяется волна, появляется в направлении её распространения давящая сила, которая во всякой точке численно равна количеству находящейся там энергии, отнесённой к единице объёма».

Дальнейшее обоснование этих максвелловых сил давления электромагнитных волн мы находим у Хевисайда²⁾, Лорентца³⁾, Кона⁴⁾ и Д. А. Гольдгаммера⁵⁾.

Бартоли (1876)⁶⁾ пришёл к тождественному выводу, следуя по совершенно иному пути и, видимо, не зная указанного

¹⁾ J. C. Maxwell, Treatise on electricity and magnetism, § 792.

²⁾ O. Heaviside, Electromagnetic Theory 1, 334 (London, 1893).

³⁾ H. A. Lorentz, Versuch einer Theorie der electromagnetischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern, стр. 29 (Leiden, 1895).

⁴⁾ E. Cohn, Das electromagnetische Feld, стр. 543 (Leipzig, 1900).

⁵⁾ D. Holdhammer, Ann. d. Phys. 4, 834 (1901).

⁶⁾ A. Bartoli, Exner's Rep. d. Physik 21, 198 (1884), немецкий перевод из Nuovo Cimento 15, 195 (1883).

Максвеллом свойства луча: Бартоли указывает круговые процессы, которые должны бы дать возможность при помощи подвижных зеркал переводить лучистую энергию от более холодного тела к более теплomu, и вычисляет ту работу, которую надо затратить в этом случае согласно второму закону термодинамики. Необходимость затрачивать работу при передвижении зеркала навстречу падающему лучу заставляет предположить, что падающий луч давит на зеркало. Бартоли вычислил величину этого давления; результат, им полученный, совершенно совпадает с результатом, полученным Максвеллом.

По пути, указанному Бартоли, последовал Больцман¹⁾, за ним кн. Б. Б. Голицын²⁾ и Guillaume³⁾ при вычислениях давления лучей, а Друде⁴⁾ распространил этот метод на абсолютно чёрное тело.

Если пучок параллельных лучей падает отвесно на плоскую поверхность, то величина максвелло-бартолиевого давления определяется количеством падающей в секунду энергии E , коэффициентом отражения поверхности и скоростью распространения луча v ; тогда

$$p = \frac{E}{v} (1 + \rho),$$

где ρ заключено между 0 в случае абсолютно чёрной и 1 в случае абсолютно отражающей поверхности.

Величина этого давления лучей весьма мала. Как Максвелл, так и Бартоли вычислили, что лучи солнца, падая отвесно на плоскую поверхность в 1 м^2 , должны производить давление, которое в случае чёрной поверхности равняется 0,4 миллиграмма, а в случае зеркала — 0,8 миллиграмма.

Предположения, что лучи света должны производить давление, были высказаны уже гораздо раньше. Так, Ке-

1) L. Boltzmann, Wied. Ann. 22, стр. 33, 291, 616 (1884).

2) B. Galitzine, Wied. Ann. 47, 479 (1892).

3) Ch. Ed. Guillaume, Archives des Sciences phys. et nat. de Genève 31, 121 (1894).

4) P. Drude, Lehrbuch der Optik, стр. 447 (Leipzig, 1900).

плер (1619), стараясь объяснить характерную форму кометных хвостов, впервые высказал мысль, что эта форма обусловлена давлением солнечных лучей на частицы вещества хвостов; это предположение находилось в полном согласии с господствовавшей в то время гипотезой истечения и нашло горячую поддержку со стороны Лонгомонтануса (1622)¹⁾. То же явление побудило Эйлера (1746)²⁾ приписать световому лучу давящие силы, и он сделал попытку теоретически обосновать их, рассматривая световую волну (по Гюйгенсу) как продольное колебание.

Де-Мейран (1754)³⁾ предпринял совместно с Дю-Фейем первые весьма интересные опыты, чтобы убедиться в справедливости указанных выше предположений, но он должен был оставить их, так как конвекционные токи в окружающем воздухе препятствовали наблюдению предполагаемого явления; если принять во внимание те средства, которыми мог располагать экспериментатор в XVIII веке, то опыты Де-Мейрана заслуживают самого большого удивления. Аналогичные опыты были предприняты потом Френелем (1825)⁴⁾, которого остановили те же затруднения; подробное изучение явлений, имеющих здесь место, повело Крукса⁵⁾ к открытию радиометрических сил.

Максвелло-бартолиевы силы давления лучей могут со временем получить большое значение в вопросах физики и астрономии, а потому опытное исследование этих сил является тем более желательным, что теоретические обоснования их как по Максвеллу, так и по Бартоли опираются на определённые элементарные свойства поглощающих и отражающих поверхностей, и потому может возникнуть вопрос, действительно ли *только* этими элементарными свойствами

¹⁾ См. ниже у de Mairan, стр. 355—356.

²⁾ L. Euler, Histoire de l'Academie de Berlin 2, 121 (1746).

³⁾ De Mairan, Traité physique et historique de l'Aurore Boréale (Seconde Edition), стр. 371 (Paris, 1754).

⁴⁾ A. Fresnel, Ann. de Chimie et de Phys. (2) 29, 57, 107 (1825).

⁵⁾ W. Crooks, Philos. Transact. of the R. S. of London 164, 501 (1874); в этой работе находится сводка относящейся сюда литературы.

поверхностей обусловлены силы давления и в случае *световых* лучей. Этот вопрос может быть разрешён только при помощи дополнительных исследований; самым прямым путём является непосредственный опыт.

Попытки, которые сделали в этом направлении Целльнер¹⁾ и Бартоли (цит. выше, стр. 205), не привели к положительным результатам; вот почему я и предпринял ниже следующее опытное исследование светового давления²⁾.

I. Предварительные опыты.

В своём учебнике Максвелл (§ 793) говорит:

«Сконцентрированный электрический свет будет производить, вероятно, ещё большее давление (чем солнечный свет), и нет ничего невозможного в том, что лучи такого света, падая на тонкую металлическую пластинку, легко подвешенную в пустоте, будут оказывать на эту пластинку заметное механическое действие».

Когда я приступал к своим опытам, я полагал, что расположение, указанное Максвеллом, не приводит к цели, так как на этом пути уже потерпел неудачу Целльнер³⁾; он же «обратил внимание на то обстоятельство, что теоретически предсказанная Максвеллом числовая величина (светового давления) приблизительно в 100 000 раз менее той, которую наблюдал в одном частном случае Крукс»⁴⁾. Если и можно было надеяться уменьшить в очень значительной мере эти побочные радиометрические силы, то всё же, казалось мне, решающее значение может иметь только такой

1) F. Zöllner, Pogg. Ann. 160, 154 (1877).

2) Предварительное сообщение об этом исследовании было сделано мною на Первом интернациональном конгрессе физики в Париже (в августе 1900); перевод сообщения помещён в Ж.Р.Ф.Х.О. (ч. физ.) 32 (1), стр. 211, 1900.

3) F. Zöllner, цит. выше, стр. 155.

4) В основу своего подсчёта Целльнер положил слишком малую величину для энергии излучения свечи. Если сопоставить радиометрические силы, которые наблюдал E. Nichols (Wied. Ann. 60, 405 (1897)), с теми силами давления, которые вычисляются по Максвеллу и Бартоли из данных Ангстрёма (Wied. Ann. 67, 647 (1899)) относительно излучения свечи, то отношение получается около 10 000.

опыт, в котором удастся каким-либо образом компенсировать действие этих сил.

При исследовании радиометрических сил Шустер¹⁾ показал, что это суть внутренние силы радиометра; Риги²⁾ подтвердил этот результат очень изящным опытом: «Я устроил так,— говорит Риги,— что радиометр плавал на поверхности воды вверх ногами; стеклянная шапка мельницы лежала при этом на той трубке, которая обыкновенно удерживает вращающийся стержень мельницы в вертикальном положении. Благодаря этому возникали силы трения, не допускавшие вращения мельницы. Когда я теперь направил на крылышко мельницы сильный пучок света, я не мог обнаружить ни малейшего вращения (радиометра)».

К тому же выводу пришли и Бертэн и Гарб³⁾, повторявшие этот опыт.

Желая обнаружить на опыте максвелло-бартолиевы силы светового давления, я воспользовался расположением Риги в таком виде: между двумя кружками, вырезанными из тонкого листового никкеля, была зажата согнутая в виде цилиндра слюдяная пластинка. Цилиндр служил телом радиометра; внутри его находилось неподвижно скреплённое с ним крылышко. Этот радиометр был подвешен на стеклянной нити внутри эвакуированного стеклянного баллона. Когда я направлял на крылышко свет дуговой лампы, я постоянно наблюдал⁴⁾ отклонения, которые были одного порядка с теми, которые вычисляются по Максвеллу-Бартоли⁵⁾.

1) A. Schuster, Phil. Mag. (5) 2, 313 (1876).

2) A. Righi, дословный перевод приведён у Bertin et Garbe, см. ниже.

3) Bertin et Garbe, Ann. de Chim. et de Phys. (5) 11, 67 (1877).

4) Если Риги, а также Бертэн и Гарб не заметили *никаких* сил Максвелла-Бартоли, то это зависело *исключительно* от того, что их расположение, рассчитанное на гораздо большие радиометрические силы, было недостаточно чувствительно для измерения сил светового давления.

5) Результаты этих предварительных опытов были доложены 17 мая 1899 года в заседании Société Vaudoise в Лозанне (Arch. des Sc. phys. et nat. Genève 8, 184 (1899)). Случайные обстоятельства помешали своевременному появлению предполагавшейся обстоятельной заметки, и она осталась ненапечатанной.

Когда при этих предварительных опытах я стал изучать для сравнения силы, действующие на самое крылышко, без слюдяной оболочки, я нашёл, что наблюдаемые при этом радиометрические силы далеко не достигают величины, которую указывает Целльнер. Вызываемое ими возмущение оказывается даже меньше того возмущения, которое обуславливается конвекцией. Последняя проявляется в очень сильной степени при сравнительно крупных размерах наружного сосуда радиометра. Поэтому я оставил этот метод и перешёл к другим опытам, которые я произвёл по простому методу, указанному Максвеллом.

II. Расположение опытов и приборы.

Как ни просто максвелловское расположение опыта, оно встречает, однако, два существенных затруднения, обусловленных, с одной стороны, *конвекционными токами*, а с другой — *радиометрическими силами*. При самых высоких разрежениях эти побочные силы значительно уменьшаются, но и с ними все-таки приходится считаться при измерениях светового давления.

Возникновение конвекционных сил обусловлено тем, что при нагревании крылышка прибора падающими на него лучами одновременно нагреваются и прилегающие слои газа, благодаря чему образуется восходящее течение; если плоскость крылышка хотя немного наклонена по отношению к вертикали, то восходящее течение заставляет крылышко перемещаться, причём направление и величина этого перемещения зависят *только* от степени нагревания и *не зависят* от направления, по которому падают нагревающие лучи. Эти силы можно исключить при измерениях, заставляя лучи того же источника попеременно падать то с одной, то с другой стороны крылышка.

Что касается радиометрических сил, то они были сведены при моих опытах до возможного минимума тем, что был взят весьма большой стеклянный баллон¹⁾ ($D = 20$ см),

¹⁾ См. W. Crooks, Philos. Transact. of the R. S. of London 170, 113 (1879).

при помощи соответствующего светофильтра были исключены все лучи, которые могли бы быть поглощаемы стенками баллона¹⁾, крылышки были сделаны из тонкого металла, для того чтобы разница температур обеих поверхностей была по возможности мала, и разрежение²⁾ было ведено (при помощи ртутного насоса и последующего охлаждения охлаждающей смесью) до возможно высокой степени.

Когда радиометрические силы малы, то вызываемую ими поправку при измерении светового давления можно вычислить на следующих основаниях: радиометрические силы обусловлены разницей температур освещённой и неосвещённой поверхностей крылышка, причём для двух равновеликих крылышек из одинакового материала и имеющих одинаковые свойства поверхностей эти силы прямо пропорциональны *толщинам*³⁾ крылышек; если мы будем одновременно наблюдать *два* одинаковых крылышка, имеющие очень значительную разницу толщин, то мы можем *вычислить*, как велико было бы отклонение, вызываемое световым пучком, если бы толщина крылышка была равна нулю, что соответствует и радиометрическим силам, равным нулю. Я позволю себе здесь же заметить, что эту поправку пришлось делать только для платинированных крылышек; у крылышек с зеркальными поверхностями радиометрические силы были, против ожидания, настолько малы, что исчезали в неизбежных ошибках наблюдений, обусловленных другими причинами.

Помимо приведённых выше, по своей природе известных побочных сил, можно указать ещё и на возможную гипо-

1) См. W. Crooks, Philos. Transact. of the R. S. of London 168, 266 (1878).

2) См. W. Crooks, цит. выше, стр. 300.

3) В моих опытах разница температур между освещённым крылышком и стенками баллона была во много раз больше, чем разница температур между двумя поверхностями самого крылышка. Какой функции первой разницы температур ни соответствует величина радиометрических сил, их пондеромоторное действие на крылышко представляет собой их разность на двух поверхностях крылышка, и эта последняя, с достаточной степенью приближения, прямо пропорциональна второй разнице температур.

тезу, что открытое Ленардом и Вольфом¹⁾ распыление освещённых тел может сопровождаться заметными реакционными силами, которые являются неизбежными спутниками максвелло-бартолиевых сил давления света; эти гипотетические добавочные силы должны, однако, зависеть как от

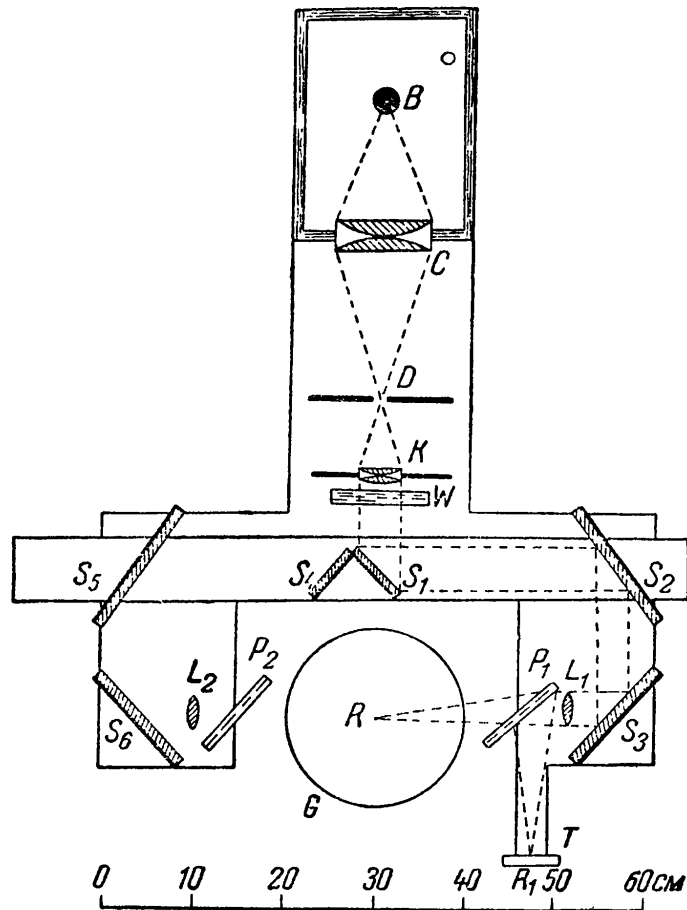


Рис. 40.

длины волны падающего света, так и от химической природы крылышка; приведённые ниже опыты с цветными светофильтрами и с разными крылышками не дали возможности обнаружить сколько-нибудь заметного действия этих гипотетических реакционных сил.

Общее расположение приборов было следующее (рис. 40, план):

¹⁾ Ph. Lenard und M. Wolf, Wied. Ann. 37, 455 (1889).

Изображение кратера $B(+)$ угля дуговой лампы (30 ампер) собиралось при помощи конденсатора C на металлическую диафрагму D ($d = 4$ мм). Выходящий из диафрагмы расходящийся пучок лучей падал на линзу K и шёл дальше параллельным пучком; для того чтобы освободить этот пучок от ультракрасных лучей, за линзой K находился стеклянный сосуд с плоскопараллельными стенками W , наполненный чистой водой¹⁾ (толщина слоя 1 см); для того чтобы изменять окраску лучей, в этом месте можно было помещать добавочное красное («фотографическое») стекло или заменять чистую воду голубым аммиачным раствором медной соли²⁾.

На своём дальнейшем пути пучок параллельных лучей претерпевал трёхкратное отражение от стеклянных (амальгамированных) зеркал S_1 , S_2 и S_3 и, собираясь при помощи линзы L_1 , давал действительное увеличенное ($d' = 10$ мм) изображение R диафрагмы D внутри стеклянного баллона; при передвижении двойного зеркала S_1S_4 пучок лучей проходил аналогичный путь и падал с другой стороны на крылышко, помещённое в стеклянном баллоне. Линзы L_1 и L_2 имели каждая фокусное расстояние в 20 см при отверстии в 5 см; таким образом конический пучок света имел угол схождения в 15° . Всё приспособление с зеркалами было накрепко соединено с фонарём дуговой лампы; этот последний помещался на салазках, при помощи которых его легко было отодвигать от баллона; установочные винты и передвижение на салазках позволяли наводить пучок лучей на исследуемое крылышко.

Оградить результаты наблюдений от влияния тех случайных скачков в яркости света, которые неизбежно связаны с вольтовой дугой, возможно было только путём увеличения числа наблюдений.

1) Этим способом исключались все лучи $\lambda > 1,2 \mu$; со своей стороны стеклянные линзы задерживают ультрафиолетовые лучи.

2) При красном, а также при голубом светофильтре количество проходящей световой энергии сокращается до одной пятой белого света; это служит доказательством того, что лучи, с которыми приходилось экспериментировать, почти исключительно принадлежали видимой части спектра.

Для того чтобы приводить отдельные ряды наблюдений к некоторой средней яркости света, служило следующее приспособление: между линзой L_1 (рис. 40) и стеклянным баллоном была поставлена тонкая плоская пластинка P_1 под углом в 45° к направлению падающих лучей. Большая часть света свободно проходит через пластинку; отражённая часть света, собираясь, даёт действительное изображение R_1 диафрагмы, которое падает на термобатарей.

Термобатарея (рис. 41) состояла из пяти элементов — «константан-железо» (толщина проволок = $0,025$ мм), которые были укреплены в эбонитовой рамке и закрыты

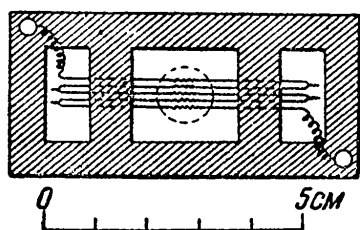


Рис. 41.

стеклянными пластинками; относительная яркость падающего света измерялась отклонениями гальванометра д'Арсонваля. Для того чтобы в одинаковой степени ослабить и пучок лучей, проходящий через линзу L_2 , здесь была вставлена такая же стеклянная пластинка P_2 . Яркость света контролировалась только в том случае,

когда двойное зеркало S_1S_4 (рис. 40) находилось в указанном положении; при сдвигении двойного зеркала свет не мог падать на термобатарею, и это положение служило для определения нулевой точки гальванометра.

Для опытов служили три различных прибора (рис. 42) с разными крылышками.

I прибор (рис. 42, *I*) состоял из стеклянного стержня G , к которому были прижаты платиновыми кольцами (без помощи замазки) два креста из листовой платины различной толщины; для того чтобы крылышки (диаметр = 5 мм) всех приборов сделать равновеликими, их пришлось вырезать стальным штанцем. Два крылышка прибора *I* имели с обеих сторон зеркальные поверхности, два других были с обеих сторон гальванически покрыты платиновой чернью¹⁾, причём

¹⁾ См. F. Kurlbaum, Wied. Ann. 67, 848 (1899). Полезно при начале платинирования в течение 30 секунд непрерывно и сильно двигать крылышко в ванне; поверхность крылышка приобретает слабую, серую, как сталь, окраску; После этого губчатая платина, при неподвижной ванне, садится на поверхность крылышка очень прочно.

более толстое крылышко подвергалось в пять раз более продолжительному платинированию. Для того чтобы подвешивать прибор к крючку крутильной нити, к стеклянному стержню *G* была припаяна платиновая петля *O*. Петля эта лежала в плоскости, перпендикулярной к плоскости крылышек, чтобы при подвешивании стержень *G* устанавливался в плоскости крылышек совершенно свободно.

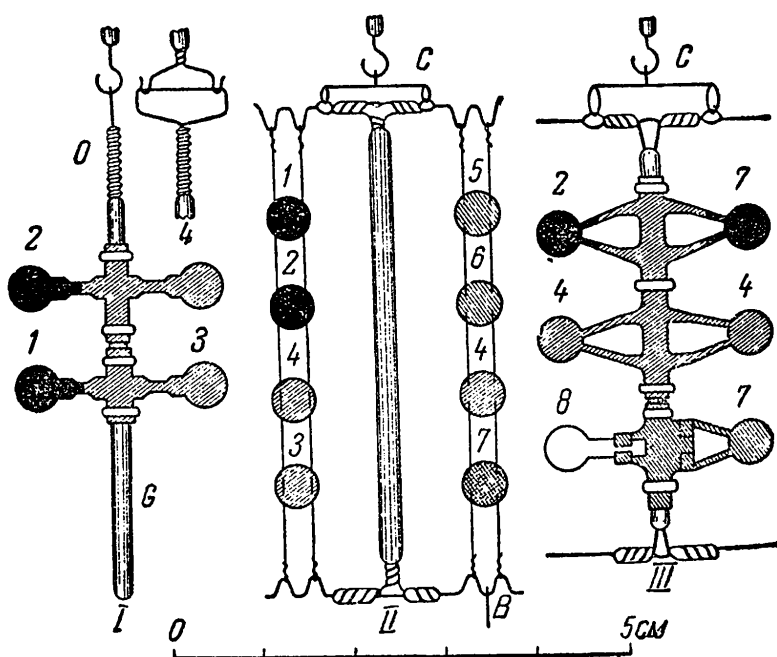


Рис. 42.

II прибор (рис. 42, *II*) также состоял из стеклянного стержня, к концам которого были припаяны поперечные платиновые проволоки. Между этими держалами были натянуты тонкие (0,05 мм) платиновые проволоки, которые проходили через маленькие отверстия в металлических крылышках и удерживали крылышки в вертикальной плоскости; эти проволочки были настолько тонки, что их радиометрическими действиями можно было пренебречь. *II прибор* был снабжён кардановским подвесом *C* из платиновой проволоки, при помощи которого он и подвешивался к крючку крутильной нити; добавочный платиновый грузик *B* удерживал стеклянный стержень в вертикальном положении.

III прибор был так же построен, как *I прибор*, с той разницей, что он был снабжён кардановским подвесом.

Узкие металлические полоски (ширина 0,3 мм), поддерживающие круглые крылышки, в достаточной мере обеспечивали вертикальное положение последних; слюдяное крылышко (8) было вставлено в лёгкую оправу из алюминия. К стеклянному стержню были приделаны сверху и внизу поперечные проволоки из алюминия, для того чтобы при опускании прибора в баллон крылышки не могли ударяться о стенки стеклянной шейки.

Опыты были произведены со следующими крылышками:

№	М а т е р и а л.
1.	Платина, платинированная толстым слоем.
2.	Платина, платинированная в пять раз тоньше.
3.	Платина металлич. (зеркальн. поверх.), толщина 0,10 мм.
4.	Платина » » » » 0,02 >
5.	Алюминий » » » » 0,10 >
6.	Алюминий » » » » 0,02 >
7.	Никель » » » » 0,02 >
8.	Слюда, толщина 0,01 >

В качестве крутильной нити служила *стеклянная нить* (длина 30 см), которая на нижнем конце несла плоское зеркало и крючок для подвешивания приборов, а сверху была зажата в железном зажиме (рис. 43) внутри ртутного шлифа¹⁾; чтобы прикрепить нить *без помощи замазки*, её концы были зажаты между кусочками прокалённого асбестового картона, и эти последние внизу прижаты платиновым кольцом к державе зеркала, а сверху схвачены зажимом.

Зеркало помещалось в платинированной алюминиевой оправе; оно было покрыто (при помощи распыления катода в пустоте) слоем металлической платины, так как серебряные зеркала скоро разъедаются ртутными парами. При сравнительно слабой отражательной способности подобного зеркала и несовершенстве изображения, благодаря двойному прохождению луча через стенки баллона, освеще-

¹⁾ Все стеклянные шлифы, исполненные безукоризненно, были доставлены фирмой С. Крагер в Фрейбурге (Баден).

щение скалы по Велльман-Мартенсу¹⁾ оказалось замечательно удобным.

При определении величины направляющей силы из колебаний на крючок крутильной нити накладывалась медная проволока в 4 см длины, масса которой была 0,314 г.

Наблюдения были произведены с тремя различными крутильными нитями, направляющие силы которых были так подобраны, что при расстоянии от скалы до зеркала в 1200 делений скалы двойное отклонение при освещении крылышек с зеркальными поверхностями достигало от 40 до 90 делений скалы. При этом периоды одного колебания (в одну сторону) вышеописанных трёх приборов были 15, 35 и 13 секунд.

Разрежение производилось автоматическим насосом Кальбаума²⁾; измерения давления промером Мак-Леода-Кальбаума²⁾ показали, что легко достигаются разрежения, при которых парциальное давление воздуха меньше 0,0001 мм, (т. е. меньше одной пятнадцатой части давления насыщенных паров ртути при комнатной температуре).

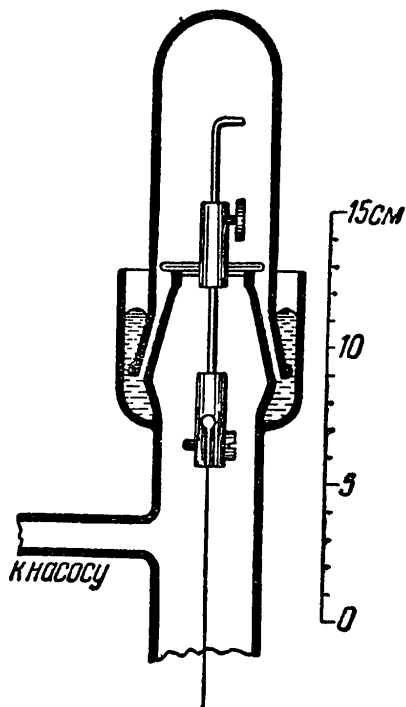


Рис. 43.

¹⁾ F. Martens, Wied. Ann. 62, 206 (1897); 64, 625 (1898). Прибор получен от Schmidt und Haensch, Berlin, цена около 70 марок. Подобную скалу я очень рекомендую при работах с чувствительными гальванометрами и малыми зеркалами.

²⁾ G. Kahlbaum, Wied. Ann. 53, 109 (1894). Для избежания паров смазки от крана, который служит для предварительной откачки, между этим краном и насосом был устроен барометрический запор. Очень существенным добавлением, в видах прочности насоса, служила железная вставка в канал для падающей ртути. Прибор был получен от C. Kramer в Freiburg in Br. (Германия). Цена около 350 марок. Основываясь на многолетнем опыте работы с автоматическими ртутными насосами разных типов, я должен признать насос Кальбаума наиболее совершенным прибором из всех мне известных как по простоте ухода за ним, так и по высоте достигаемого разрежения.

Для того чтобы получить ещё большее разрежение, служил следующий приём (рис. 44): капля ртути Q была помещена на дно стеклянного баллона B , затем воздух разрежался насосом, и ртутная капля нагревалась в водяной бане K_1 на 5°C выше комнатной температуры; испаряясь, ртуть перегоняется в насос и увлекает с собой остатки воздуха из баллона. Если отделить баллон от насоса и осушителя P при помощи барометрического запора V , то в баллоне оста-

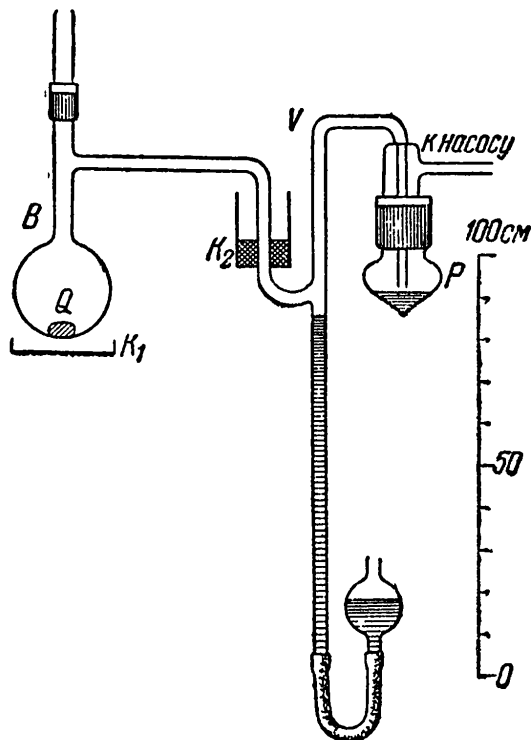


Рис. 44.

нутя только ртутные пары: их давление уменьшится до весьма малой величины, если наполнить сосуды K_1 и K_2 охлаждающей смесью из льда и соли.

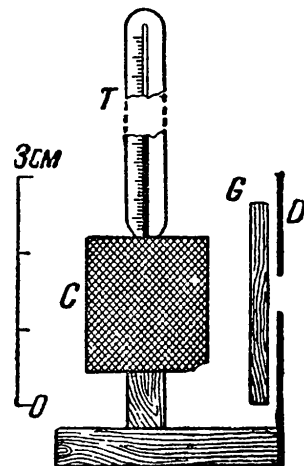


Рис. 45.

Энергия падающих на крылышко лучей измерялась калориметрически: фонарь с зеркалами (рис. 40) отодвигался на салазках от баллона настолько, что крылышко прибора могло быть замещено равной ему по величине ($d = 5 \text{ мм}$) диафрагмой D (рис. 45 и рис. 46); все лучи, проходящие через диафрагму, поглощались калориметром. Стекла́нная пластинка G компенсировала ослабление света при отражении от стеклянной стенки баллона; она ставилась между диафрагмой и калориметром, чтобы задерживать тепловое излучение диафрагмы.

I калориметр (рис. 45) состоял из куска меди, в котором был просверлен вертикальный канал, наполненный ртутью; в ртути помещался шарик очень маленького калориметрического термометра, делённого на пятые доли градуса; поглощающая поверхность калориметра была закопчена. Вычисленная общая калориметрическая ёмкость прибора (полагая удельную теплоёмкость меди $= 0,093$) равнялась $3,13$ г воды.

II калориметр (рис. 46) представлял собой медный цилиндр, как и в первом калориметре, с общей тепловой ёмкостью, равной $3,61$ г воды; его поглощающая поверхность была предварительно вызолочена, а потом гальванически покрыта платиновой чернью; этот цилиндр находился в медной трубке, помещённой внутри водяной бани, около одного литра в объёме; баня была снабжена мешалкой *R*. Для того чтобы охладить калориметр ниже температуры бани, до начала опыта вводились по стеклянной трубке *A* несколько капель этилового эфира в коническое углубление калориметра, и затем, при помощи резинового меха *B*, прогонялся воздух, который и уносил с собой пары испаряющегося эфира.

Измерения показали, что на диафрагму ($d = 5$ мм) падает в минуту от $1,2$ до $1,8$ г·кал, т. е. что яркость освещения при моих опытах была от двух до трёх раз больше энергии солнечных лучей у поверхности земли.

Для определения коэффициента отражения исследованных металлов служил фотометр по Ritchie (рис. 47). Свет

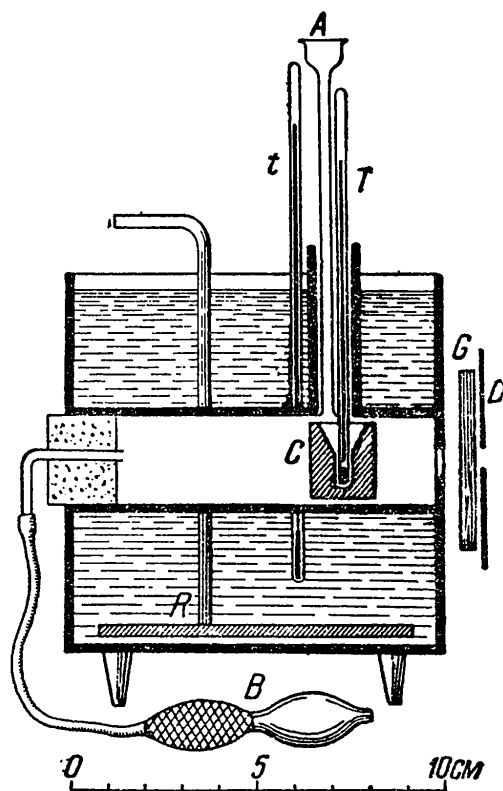


Рис. 46.

двух маленьких лампочек накаливания L_1 и L_2 падал, проходя диафрагмы D_1 и D_2 (диаметр $= 3$ мм), на маленькую призму K из мела, причём ребро этой последней наблюдалось лупой B . Передвигая лампу L_1 , можно было устанавливать на одинаковую яркость. Передвигая затем лампу L_2 приблизительно на 130° в L'_2 и придвигая снаружи вплот-

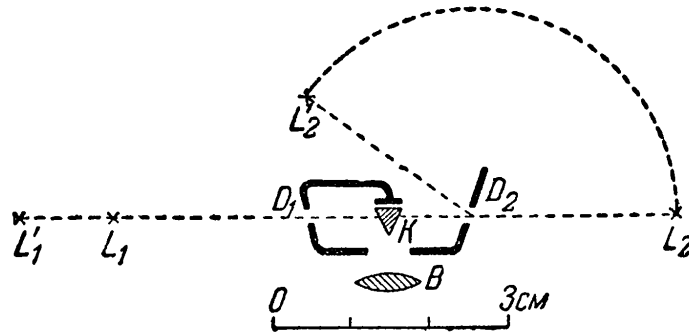


Рис. 47.

ную к диафрагме D_2 исследуемую металлическую пластинку, можно было снова передвижением лампы L_1 в L'_1 установить на одинаковую яркость. Для угла падения в 25° коэффициент отражения $\rho = (L_1K:L'_1K)^2$.

III. Опыты.

Вышеописанные приспособления позволяют экспериментально решить два основных вопроса:

1) производят ли лучи света какое-либо пондеромоторное действие, независимое от известных уже вторичных (конвекционных и радиометрических) сил, и

2) соответствуют ли эти новые силы света максвелло-бартолиевым силам давления лучистой энергии.

Перед началом опытов были предварительно изучены основные свойства всего оптического расположения: передвигая добавочный термоэлемент, соединённый с гальванометром д'Арсонваля, вдоль оптической оси линз L_1 и L_2 (рис. 40), можно было определить их фокусное расстояние для наиболее ярких лучей пучка. Затем зеркала и линзы прибора были выверены таким образом, чтобы действитель-

ные изображения диафрагмы при ходе лучей как справа, так и слева вполне совпадали.

Для того чтобы сравнить яркости пучков, идущих справа и слева, добавочный термоэлемент был помещён на месте образования действительных изображений диафрагмы и переменнo освещался то справа, то слева; из большого числа измерений обыкновенно следовало, что существует некоторая малая разница (около 1⁰/₀) между яркостями обоих пучков; при большом числе отражающих стеклянных поверхностей такая разница уже вызывается несимметричным сметанием пыли.

При передвижении добавочного термоэлемента на $\pm 0,5$ см из его главного положения в направлении оси пучка, в пределах, в которых могут колебаться установки пучка на крылышко, наблюдается уменьшение яркости для обоих направлений освещения на 5⁰/₀.

Эти предварительные испытания совершенно необходимы.

Приборы с крылышками были всегда так помещены внутри баллона, чтобы лучи источника, проходящие мимо крылышка, отражённые и снова собранные вогнутой стенкой баллона, не падали на части подвешенного прибора.

После того как прибор с крылышками бывал помещён в баллон, начиналось откачивание, продолжавшееся несколько дней, причём последние откачивания производились при подогревании стенок баллона и при одновременном освещении отдельных крылышек светом дуги. Перед каждой серией наблюдений нижняя часть баллона, где находилась капля ртути, нагревалась в водяной бане на 5° С выше комнатной температуры¹⁾, затем в течение от одного до двух часов снова производилось откачивание, после чего барометрический запор *V* поднимался, и следовало охлаждение строганым льдом и солью.

Самой существенной помехой при производстве измерений являются конвекционные токи; они сказываются в не-

¹⁾ При указанной малой разнице температур ртуть не осажается на более холодные стенки прибора, это явление, имеющее место при несмачиваемых поверхностях, было указано М. Cantor'ом, Wied. Ann. 56, 493 (1895).

прерывном ходе нуля, причём как быстрота, так и направление этого хода зависят от случайных условий (даже для одного и того же крылышка в разные дни наблюдений). В течение одной серии наблюдений указанный «ход» нуля бывает обыкновенно настолько незначителен, что, увеличивая число отдельных наблюдений, его легко было исключить. Эта конвекция остатков ртутных паров обуславливается нагреванием освещаемого крылышка, а также случайным внешним неравномерным нагреванием стенок баллона и в особенности неизбежной разницей температур двух охлаждаемых ртутных поверхностей. При наблюдениях без охлаждения колебания, обусловленные конвекцией, сказываются гораздо резче, чем при охлаждении льдом с солью; при более высоких давлениях воздуха наблюдения делаются, благодаря конвекции, настолько затруднительными, что измерения представляются едва возможными.

Другая причина, вызывающая колебание отсчётов, — это непостоянство вольтовой дуги, которое сказывается и при самых лучших углях¹⁾. Скачки в яркости дуги сказываются в изменениях (увеличении или уменьшении) отдельных амплитуд колебаний прибора; их возможно исключить только увеличением числа отдельных наблюдений.

При помощи двух труб наблюдатель мог попеременно отсчитывать отклонения прибора с крылышками и гальванометра; помощник²⁾, наблюдавший за правильным горением дуги, по команде перемещал двойное зеркало S_1S_4 (рис. 40). Замыкая освещение с периодическими перерывами, можно довести амплитуду колебаний прибора до нужной величины.

Таблица I даёт начало одного из протоколов наблюдений.

¹⁾ Вполне удовлетворительными оказались угли «А» Сименса; при более дешёвых углях наблюдения едва ли возможны.

²⁾ Моим помощником при этих опытах был помощник препаратора при кабинете Автоном Фёдоров; его добросовестное отношение и ловкое обращение с приборами в значительной мере облегчили мне эти нелёгкие наблюдения.

Т а б л и ц а I.

III прибор. Платинированное крылышко (2).
 Расстояние центра кружка от оси вращения = 9,2 мм.
 Охлаждение льдом с солью.
 Расстояние до скалы $A = 1195$ делений скалы.

L_1		L_2		L_1		L_2	
	выч.		выч.		выч.		выч.
	306	115		307	174		
176	240	206	295	184	245	210	244
	239	207		244	303	177	211
177	239	208	296	184	243	212	245
	240	209		243	300	180	213
178			294	189			
240		208		244		212	
Отклон. 32 дел. скал.				36 дел. скал. 32 дел. скал.			
G_1		G_2		G_1		G_2	
308				314			
305		201		312		201	
312				314			
314				316			
<u>310</u>				<u>314</u>			
Гальваном. 109 дел. скал., 113 дел. скал., 113 дел. скал.							
Отклон. привед.: $(G = 100)$ 29,3 дел. скал., 31,8 дел. скал., 28,2 дел. скал.							

В этой таблице обозначают:

L_1 и L_2 — точки поворота на скале, когда свет падал на крылышко прибора от линзы L_1 или от линзы L_2 . Средний ряд, «вычисления», даёт вычисленное (из трёх прилегающих точек поворота) положение равновесия. «Отклон.» обозначает отклонение системы при изменении направления освещения.

G_1 и G_2 дают положения гальванометра в первом и во втором случае (в последнем — нулевую точку его).

«Гальваном.» — отклонения гальванометра.

«Отклон. привед. ($G = 100$)» дают вышеобозначенные отклонения прибора, приведённые к постоянному отклонению гальванометра в 100 делений скалы.

Указанным в табл. I способом производилось по семи рядовых отсчётов для L_1 и L_2 и из «Отклонений приведённых ($G = 100$)» выводилось среднее с обозначением средних \pm отступлений отдельных наблюдений. (Для крылышка таблицы I это двойное отклонение $a = 29,4 \pm 1,6$ дел. скалы.)

Для того чтобы сравнивать наблюдения, сделанные с различными крылышками, необходимы ещё следующие поправки.

В приборе I и III узкая полоска света падает, помимо самого кружка, и на части, его поддерживающие, благодаря чему отклонение увеличивается; измеряя площади освещённых частей и их расстояние от оси вращения, мы можем вычесть то добавочное действие, которое они производят (от 5% до 10% всей величины), и получаем то отклонение, которое обусловлено одним кружком крылышка (II прибор свободен от этой поправки). Для крылышка таблицы I эта поправка составляет 1,9 деления скалы; вычисленное двойное отклонение составляет 27,5 деления скалы.

Измерение расстояний центра кружка крылышка от оси вращения производилось следующим способом: дуговой фонарь с зеркальным прибором отодвигался на салазках в сторону, и со стороны падающих во время опыта лучей вешался возможно близко к баллону отвес из тонкой блестящей серебряной проволоки; зрительная труба с окулярным микрометром располагалась перпендикулярно к плоскости дисков на расстоянии около 4 метров, и надо было перемещать отвес до тех пор, покуда он не покрывал собой крутильную нить. Величина, соответствующая одному делению окулярного микрометра трубы, определялась при помощи визирования масштаба, расположенного поблизости баллона; кажущееся расстояние центра кружка крылышка от отвеса

давало истинное расстояние первого от оси кручения и могло быть измерено с точностью до $\pm 0,5$ мм; измеряемые расстояния лежали между 9 и 11 мм.

На основании этих измерений наблюденные двойные отклонения были приведены к отклонениям, соответствующим расстоянию центров кружков от оси вращения, равному 1 см. Для крылышка таблицы I такое приведенное отклонение равно 29,9 деления скалы.

Для того чтобы определить абсолютную величину давления света на крылышко, необходимо было измерить в абсолютной мере величину направляющей силы крутильной нити. Вместо прибора с крылышками к крючку крутильной нити подвешивалось тело (медный цилиндр) с известным моментом инерции, и из трёх серий наблюдений, из которых каждая состояла из десяти простых качаний, выводилось среднее время одного качания¹⁾.

Т а б л и ц а II.

Время простого качания	
Одно зеркало $\frac{t_1}{2} = 5,1 \pm 0,05$ сек.	Медный цилиндр Длина = 4,0 см
Зеркало + медный цилиндр $\frac{t_2}{2} = 29,4 \pm 0,1$ сек.	Масса = 0,314 г
Направляющая сила $D = 0,00494$ дин·см.	

На основании указанной величины направляющей силы мы получаем для крылышка таблицы I при одностороннем освещении величину давления света в динах:

$$p = 0,0000308 \text{ дин} \pm 0,0000017 \text{ дин.}$$

¹⁾ Ср. F. Kohlrausch, Lehrbuch der praktischen Physik, § 29 и прим. 11 и 12. Teubner, Leipzig, 1901.

Для того чтобы проверить расчёты Максвелла и Бартоли, необходимо *вычислить* ту величину светового давления, которую следует ожидать при опытах согласно упомянутой теории, и сравнить вычисленную величину с наблюдаемой. Для этого необходимо сделать калориметрическое измерение падающей световой энергии, а также фотометрическое измерение коэффициентов отражения крылышек.

Измерения с помощью первого калориметра (рис. 45) производились следующим образом: зеркала (рис. 40) отводились по салазкам в сторону настолько, что на место приборов с крылышками можно было поставить диафрагму калориметра *D*. Затем калориметр освещался в течение 5 минут, и через каждую минуту наблюдались показания термометра (а также и гальванометра). После этого посредством непрозрачного экрана освещение прерывалось, и в следующие 5 минут снова через каждую минуту наблюдались показания термометра, которые теперь постепенно уменьшались, и нулевая точка гальванометра. Полный ряд наблюдений заключал в себе пять последовательных периодов освещения.

Все наблюдения обрабатывались графически, для чего показания термометра наносились на координатную бумагу и соединялись непрерывной кривой так, чтобы последняя протекала возможно гладко (рис. 48). Из рисунка ясно, что ход температуры уже через 10 секунд обнаруживает особой точкой поворота переход от освещения к затемнению или обратно.

Очень большая скорость охлаждения калориметра влечёт за собой необходимость особой обработки результатов, так как даже в течение одного интервала наблюдения ни скорость нагревания, ни скорость охлаждения не представляют из себя постоянной величины. Для определённой средней температуры *поверхности* калориметра обе скорости имеют постоянные значения, представляемые касательными (последние легко наносятся на чертеже). Для этих постоянных величин точки пересечения касательных с ограничивающими интервал ординатами дают те разности температур, которые установились бы в 5 минут, *если бы* обе скорости

были постоянны; сумма двух разностей даёт общее, поправленное на потери, повышение температуры калориметра.

Но здесь выступает один источник ошибок при определении истинной средней температуры поверхности: термометр не успевает следовать за температурой и даёт при освещении слишком низкие, а при охлаждении слишком высокие показания. То обстоятельство, что термометр

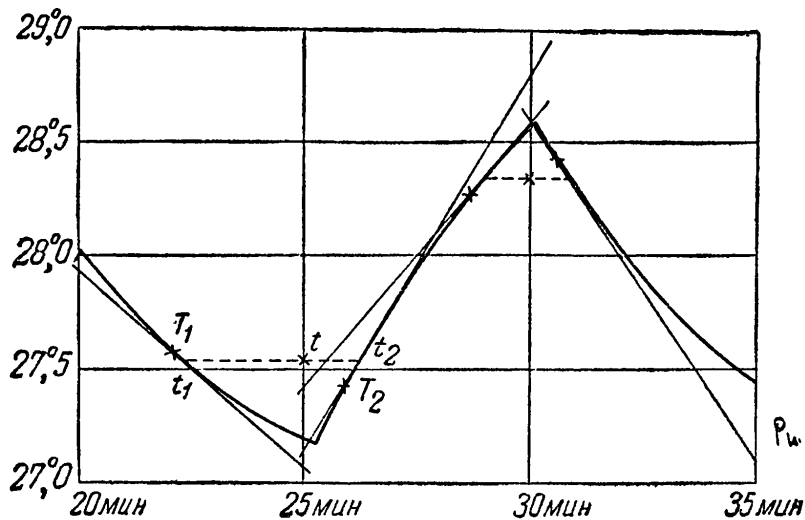


Рис. 48.

обнаруживает точку поворота через 10 сек., позволяет, в виде первого и для наших опытов достаточного приближения, допустить, что термометр отстаёт на 20 сек. Тогда для средней температуры нужно сравнивать не точки кривой t_1 и t_2 , но точки T_1 и T_2 , лежащие на той же кривой на 20 сек. раньше.

Такие графические определения были проделаны при каждом нагревании для двух температур; таблица III представляет один ряд измерений.

Со вторым калориметром (рис. 46) измерения были гораздо проще: калориметр охлаждался (на $2,5^\circ$ ниже температуры бани) при помощи этилового эфира, затем подвергался нагреванию лучами, и наблюдатель через каждую минуту отсчитывал показание калориметрического термометра (а в промежутки — отклонение гальванометра

Таблица III.

Калориметр I. Водяной эквивалент = 3,13 г.

Скорость нагревания	Скорость охлаждения	Общее нагревание	Отклонение гальванометра	Приведенное общее нагревание ($G = 100$)
I { 1°,57 1,49	0°,63	2°,30	140 дел.	1°,64
	0,80	2,29	128 »	1,79
II { 1,44 1,31	0,85	2,29	128 »	1,79
	1,10	2,40	122 »	1,97
III { 1,38 1,00	1,08	2,46	129 »	1,91
	1,37	2,37	126 »	1,88
IV { 1,30 1,04	1,15	2,45	123 »	1,99
	1,45	2,49	127 »	1,96
V { 1,26 0,93	1,27	2,54	129 »	1,97
	1,50	2,43	126 »	1,93

Общее нагревание в 5 мин. ($G = 100$) $1°,88 \pm 0°,09$.

и температуру водяной бани). Наблюдения наносились графически, соединялись сплошной кривой, на этой кривой отмечалась температура бани¹⁾, и в этой точке проводилась касательная к кривой, соответствующая *истинной* скорости нагревания калориметра, независимо от потерь через лучеиспускание; если взять две точки кривой, соответствующие времени в 2,5 мин. до и после наступления равенства температур, то мы также получим среднюю скорость нагревания калориметра в течение 5 мин. Таблица IV даёт результаты наблюдений²⁾.

1) Надо опять иметь при этом в виду, что калориметрический термометр отстаёт от истинной температуры калориметра на 20 сек.

2) Результаты таблиц III и IV не могут служить для непосредственного сравнения, так как они относятся к *различным* регулировкам термобатарей.

Таблица IV.

Калориметр II. Общая калориметрическая ёмкость = 3,61 г воды.

Ряды наблюдений	Нагревание в течение 5 мин.		Среднее	Отклонение гальваном.	Нагревание, приведенное к $G=100$ дел. скалы
	Из касательной	Из разниц температур			
I	2°,40	2°,41	2°,40	159 дел. скал.	1°,51
II	2°,55	2°,57	2°,57	163 » »	1°,57
III	2°,43	2°,50	2°,46	158 » »	1°,56

Среднее нагревание (для $G=100$) $1°,55 \pm 0°,02$.

Отсюда получаем количество падающей в течение секунды энергии:

$$E = \frac{1,55 \cdot 3,61 \cdot 4,18 \cdot 10^7}{300} \text{ эргов} = 7,74 \cdot 10^5 \text{ эргов.}$$

При наших опытах лучи падали не параллельным, а сходящимся пучком; их наклон был, однако, так незначителен, что обусловленная им поправка ¹⁾ (около 1%) могла быть опущена ввиду других гораздо больших неточностей наблюдений. Мы можем, следовательно, производить вычисления по формулам, данным Максвеллом и Бартоли для пучка параллельных лучей.

Для абсолютно чёрного тела мы получаем на основании калориметрических измерений таблицы IV величину давления p :

$$p \text{ (в динах)} = \frac{E \text{ (в эргах)}}{3 \cdot 10^{10}} = 0,0000258 \text{ дин.}$$

Для того чтобы полученные результаты выразить в удобно сравниваемых величинах, мы возьмём *единицей* сравнения

¹⁾ См. L. Boltzmann, Wied. Ann. 22, 292 (1884), а также Д. А. Гольдгаммер, цит. выше, стр. 844.

величину максвелло-бартолиева давления на *абсолютно чёрное тело*, вычисленную из калориметрических наблюдений, и назовём эту произвольную единицу «единицей МБ».

В этих единицах результаты таблицы I выразятся таким образом:

$$p = \frac{0,0000308 \pm 0,0000017}{0,0000258} = (1,19 \pm 0,07) \text{ МБ.}$$

Непосредственное измерение коэффициентов отражения исследованных крылышек являлось невозможным, потому что их поверхности оказались слишком неровными. Поэтому я определил при помощи фотометра (рис. 47) коэффициенты отражения тех металлических листов, из которых были сделаны крылышки; у этих листов неровности также сказывались в значительной степени и, кроме того, ясно выраженная окраска отражённого света (особенно у никкеля); величины этих коэффициентов отражения, измеренных для угла падения в 25° , приведены в таблице V без дальнейших приведений. Для сравнения тут же указаны коэффициенты отражения при нормальном падении лучей ($\lambda = 600 \mu$) по Гагену и Рубенсу¹⁾, и на их основании вычислены максвелло-бартолиевы силы (числа, полученные для магналиума, приведены для алюминия).

Таблица V.

	Фотометр. измерения		По Гагену и Рубенсу	
	ρ	p	ρ	p
Платина	0,5 \pm 0,05	1,5 МБ	0,64	1,64 МБ
Алюминий	0,6 \pm 0,05	1,6 »	0,83	1,83 »
Никкель	0,35 \pm 0,05	1,4 »	0,65	1,65 »

Для *слюды* я не привожу вычислений, так как наблюдения были сделаны только с одним крылышком, и нет проверочных измерений с более толстыми крылышками.

¹⁾ Н. Hagen und Rubens, Ann. d. Phys. 1, 373 (1900).

Ниже изложены результаты отдельных рядов наблюдений, сделанных мной при помощи разных приборов. Когда я перешёл от наблюдений при комнатной температуре, при которой неизбежные колебания окончательных результатов довольно значительны, к измерениям при охлаждении льдом с солью, я не ожидал получить такого согласия между наблюденными величинами и вычисленными по Максвеллу-Бартоли, которое вытекало из моих опытов; я поэтому предположил, что такое совпадение вычислений и наблюдений надо приписать случайности, и поэтому сперва заменил I калориметр II калориметром, а затем и II прибор с крылышками III прибором.

Многочисленные наблюдения, которые я делал с I прибором при комнатной температуре, значительно уступают последующим измерениям, а поэтому и не приведены мною. Не приведены также наблюдения с платинированным крылышком (2) II прибора, так как при последовавшем за опытами микроскопическом исследовании крылышка выяснилось, что платиновая чёрнь осела неудовлетворительно в виде губки (чего на других крылышках не наблюдалось). С III прибором были, к сожалению, сделаны только два ряда наблюдений, так как дальнейшие опыты были прерваны поломкой аппарата.

IV. Результаты.

Результаты опытов приведены в единицах МБ; под каждой наблюденной величиной приведено в тех же единицах и среднее колебание в установках приборов, причём все колебания, меньшие чем 0,15 МБ, обозначены 0,1 МБ; ниже 0,25 МБ обозначены 0,2 МБ и т. д.

Для того чтобы составить себе представление о точности приведённых измерений, могут служить следующие соображения: колебания при установках прибора во время измерений приведены в таблице на стр. 169; определение абсолютной величины давящей силы света (куда входят измерения направляющей силы крутящей нити, расстояния от зеркала до скалы и расстояния центра крылышка до оси вращения) возможно было сделать с точностью около

	I прибор		II прибор				III прибор	
	I калориметр		II калориметр					
	Белый свет	Белый свет	Белый свет	Красный свет	Белый свет	Синий свет	Белый свет	
1. Толсто-платинированное крылышко	1,8 ± 0,2	1,6 ± 0,1	1,5 ± 0,1	—	—	—	1,5 ± 0,1	1,4 ± 0,1
2. Тонко-платинированное крылышко	1,3 ± 0,2	—	—	—	—	—	1,2 ± 0,1	1,1 ± 0,1
Вычислено	1,2	—	—	—	—	—	1,1	1,0
3. Платина толстая	—	1,8 ± 0,1	—	—	—	—	—	—
4. » тонкая	—	2,0 ± 0,1	1,9 ± 0,2	1,8 ± 0,1	1,9 ± 0,1	(1,8 ± 0,8)	1,7 ± 0,1	(1,5 ± 0,5)
5. Алюминий толстый	—	—	2,3 ± 0,4	1,9 ± 0,1	—	—	—	—
6. » тонкий	—	—	2,0 ± 0,1	2,3 ± 0,1	2,0 ± 0,2	(2,9 ± 0,8)	2,1 ± 0,1	(2,5 ± 0,5)
7. Никкель тонкий	—	—	1,7 ± 0,3	1,2 ± 0,2	1,4 ± 0,1	(2,3 ± 0,5)	1,4 ± 0,2	(2,7 ± 0,9)
8. Слюда	—	—	—	—	—	—	—	0,08 ± 0,05
								0,13 ± 0,03

$\pm 8\%$; вычисление абсолютной величины МБ единицы из калориметрических измерений (куда входят общая водяная ёмкость, повышение температуры калориметра и близкое к единице отношение площади диафрагмы к площади круга крылышка) возможно было сделать с вероятной точностью в $\pm 7\%$; неточности в определении истинной величины коэффициентов отражения, вероятно, не превосходят $\pm 10\%$.

Указанным неточностям отдельных измерений суперпонируются случайные неточности установки середины действительного изображения диафрагмы на крылышко и возможность, что излучение нагреваемого светом крылышка отражалось от вогнутой поверхности баллона и падало на другие части подвешенного прибора, причём место этого побочного нагревания изменялось в течение одного колебания прибора. Общая случайная ошибка, возможная при описанных измерениях с *белым светом*, вероятно, не превышает $\pm 20\%$.

При опытах с красным и синим светом, при которых количество падающей энергии в пять раз меньше, случайные колебания, обусловленные конвекцией, те же, и потому точность полученных результатов соответственно меньше; то же самое надо заметить и относительно очень малых отклонений (едва достигающих четырёх делений скалы) при слюдяном крылышке. Эти опыты, которые были предприняты в виде проверочных, всё же позволяют утверждать, что в этих случаях не появляется новых пондеромоторных сил, которые по величине были бы сравнимы с максвелло-бартолиевыми силами.

Кроме того я многократно производил сравнительные измерения над тонкими и толстыми металлическими (зеркальными) платиновыми и алюминиевыми крылышками; мне, однако, не удалось обнаружить достаточно ясно выраженной радиометрической разницы; вот почему в пределах погрешностей наблюдений можно считать радиометрические силы тонких металлических крылышек равными нулю.

Полученные результаты можно формулировать таким образом:

1) Падающий пучок света производит давление как на поглощающие, так и на отражающие поверхности;

эти пондеромоторные силы не связаны с уже известными вторичными конвекционными и радиометрическими силами, вызываемыми нагреванием.

2) Силы давления света прямо пропорциональны энергии падающего луча и не зависят от цвета.

3) Наблюдённые силы давления света, в пределах погрешностей наблюдений, количественно равны максвелло-бартолиевым силам давления лучистой энергии.

Таким образом существование максвелло-бартолиевых сил давления опытным путём установлено для лучей света.

Физическая лаборатория Университета.
Москва, август 1901.





ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИЧИНЫ, ОБУСЛОВЛИВАЮЩИЕ ОТСТУПЛЕНИЯ ОТ ГРАВИТАЦИОННОГО ЗАКОНА НЬЮТОНА ¹⁾.

Вопросы об отступлениях от основного закона притяжения масс и о физических причинах, обуславливающих эти отступления, принадлежат к числу самых старых вопросов астрофизики — они старше, чем самый закон Ньютона; три столетия прошло с того времени, когда Кеплер впервые остановился на этих вопросах и указал на такое решение их, лучше которого мы и в настоящее время не можем найти. В самой резкой и притом наиболее простой форме это отступление от ньютоновского закона сказывается в движении кометных хвостов, где оно проявляется в виде резко выраженной отталкивательной силы солнца. История развития воззрений на природу этой отталкивательной силы солнца и физическое обоснование этих воззрений принадлежат к наиболее интересным главам астрофизики; здесь мы можем проследить на протяжении трёх столетий тесную связь, которая существует между астрономическими теориями и господствующими физическими представлениями ²⁾.

Кеплер (1608) высказал предположение, что кометные хвосты суть газообразные испарения кометного ядра, кото-

1) Сообщение, сделанное на съезде немецкого Астрономического общества в Геттингене 4 августа 1902 г.

2) История развития этих взглядов обстоятельно изложена у de Mairan «Traité physique et historique de l'Aurore Boréale (Seconde édition)», Paris, 1754, и у F. Zöllner, Wissenschaftliche Abhandlungen 2, Leipzig, 1878.

рые движутся независимо от этого последнего и в отличие от него не притягиваются, а отталкиваются солнцем; физическую причину этого отталкивания Кеплер искал в действии лучей солнца: господствовавшей в его время теорией света была теория истечения, которая, как к необходимому механическому следствию, приводила к представлению, что лучи света давят на те тела, на которые они падают; объяснение отталкивания кометных хвостов световым давлением не представляло никаких затруднений.

Ньютон¹⁾ (1687) указал, что то объяснение явления отталкивательных сил солнца давлением его лучей, которое дал Кеплер, вполне допустимо, но сам он сделал попытку подвести отталкивание кометных хвостов под общий закон притяжения масс, полагая, что в этом случае мы имеем дело лишь с «кажущимся» отталкиванием; Ньютон исходил из гипотезы, что мировое пространство заполнено газообразным веществом более плотным, нежели газы кометных хвостов: эти последние всплывают в окружающей среде (по закону Архимеда) и, следовательно, только кажущимся образом отталкиваются солнцем.

Эйлер²⁾ (1744), видя все те затруднения, к которым ведёт гипотеза Ньютона, снова обратился к данному Кеплером объяснению отталкивательной силы солнца давлением его лучей. В качестве ярого противника гипотезы истечения в учении о свете Эйлер стал на точку зрения Гюйгенса³⁾ и предположил, что свет представляет собой продольное колебательное движение светового эфира; он обосновывал явление светового давления, рассматривая это последнее, как результат непрерывного ряда механических толчков, которые производят продольные колебания света при падении на поверхность какого-либо тела⁴⁾.

1) I. Newton, Principia philosophiae naturalis mathematica. Lib. III. Londoni, 1687.

2) L. Euler. См. Zöllner, цит. выше, стр. 525.

3) L. Euler, Histoire de l'Academie Royale de Berne 2, p. 121, 1746.

4) На существование таких сил в случае продольных (акустических) волн недавно (Phil. Mag. 1902, March) указывал лорд Рэлей. Экспериментально они были обнаружены гораздо ранее Дворжаком (Pogg. Ann. 157, p. 42, 1876) для звуковых волн.

Около половины восемнадцатого столетия, приблизительно за 35 лет до того, как Кэвендишу (1789) впервые удалось в лаборатории наблюдать притяжение масс, де Мэран и дю Фэ¹⁾ (1754) делали первые попытки непосредственно опытным путём исследовать давление световых лучей; свои опыты де Мэран и дю Фэ производили замечательно остроумным способом, но они натолкнулись на такие затруднения (вихри в нагретом воздухе), которые для экспериментальных средств восемнадцатого столетия оказались непреодолимыми, и должны были оставить вопрос о существовании светового давления открытым.

В девятнадцатом веке общий интерес к изучению движения комет был привлечён знаменитыми исследованиями Ольберса (1812); он указал, что с отталкиванием, которое производит солнце на хвосты комет, надо считаться, как с явлением, непосредственно вытекающим из всех наблюдений; что касается до объяснения физической причины этого отталкивания, то Ольберс²⁾ отверг объяснения, данные Кеплером и Ньютоном, как гипотезы, опытом не доказанные, и с своей стороны в очень осторожной форме высказал новое предположение. «Трудно удержаться,—говорит он,—чтобы в этом случае не подумать о чём-либо аналогичном нашим электрическим притяжениям и отталкиваниям». Если мы будем иметь в виду, что Ольберс высказал своё предположение во время первых триумфов электрических исследований, то станет легко понятным сведение отталкивательной силы солнца к силам электрическим, закон дальнего действия которых уже был установлен непосредственными опытами Кулона (1785).

«Электрическая» теория Ольберса стала господствующей: свойства электрических сил убывать пропорционально квадрату расстояния (свойство, которое присуще также и силам светового давления) оказалось достаточным для построения простой теории кометных хвостов, которая была дана Бесселем³⁾ и позволяла определять абсолютную

¹⁾ De Mairan et du Feu. См. de Mairan, цит. выше, стр. 371.

²⁾ W. Olbers, Leben und Werke. 1, p. 331. Berlin, 1894.

³⁾ Bessel, Astronom. Nachr. 13, 185 (1836).

величину отталкивательной силы солнца из кривизны кометных хвостов; из измерений большого числа кометных хвостов Ф. А. Бредихин¹⁾ определил величины отталкивательных сил и нашёл, что они являются характерными постоянными различных веществ, находящихся в хвостах комет; абсолютные величины отталкивательных сил (по сравнению с силой притяжения) Ф. А. Бредихин нашёл равными 0,2; 1,1 и 17,5.

«Электрическая» теория Ольберса опирается на две гипотезы: во-первых, что на солнце находится постоянный электрический заряд, и, во-вторых, что отдельные молекулы газов хвоста при их выделении из кометного ядра получают электрические заряды, одноимённые с зарядом солнца. За время существования этих гипотез физическое обоснование их не сделало сколько-нибудь заметных успехов: предположение, что на солнце находится электрический заряд, удаётся привести в связь с магнитными явлениями на земле, лишь прибегая к добавочным гипотезам; впрочем, до сих пор не удалось определить не только абсолютной величины заряда солнца, но даже знака его. Что касается до электризации отдельных молекул при тех условиях, при которых, согласно второй гипотезе, она должна иметь место, то такого рода электризации физики и по сей день не могли подметить в своих лабораторных опытах.

Чтобы доказать существование электризации газов хвоста, часто указывают на сходство свечения кометных хвостов со свечением в гейслеровских трубках; такой способ доказательства не выдерживает критики и противоречит принципу сохранения энергии, согласно которому всякое свечение сопряжено с отдачей энергии, а таковое не может иметь места в случае электростатически неизменно заряженных газовых молекул; причину свечения кометных хвостов следует искать во флуоресценции²⁾ сильно осве-

¹⁾ Th. Bredichin, *Annales de l'observ. de Moscou* (2) 1, 45 (1886).

²⁾ Кроме флуоресценции в сильно разрежённых газах при освещении возможны излучения в связи с резонансом; для электромагнитных резонаторов, находящихся в поле электромагнитных волн, такие излучения предсказываются теорией и обнаружены также на опыте.

щённых газов, которую непосредственно опытным путём исследовали Ломмель¹⁾, Видеман и Шмидт²⁾.

Насколько серьёзны те возражения, которые можно сделать против существования вышеприведённых электрических гипотез, указал сам Целльнер³⁾, которому физическое обоснование электрической теории обязано более, чем кому-либо другому: он заявил, что отступится от электрической теории, коль скоро будет доказано, что лучи солнца могут производить давление на освещаемые ими тела.

Существование давления света было обосновано (совершенно независимо от каких-либо астрофизических теорий) тридцать лет тому назад Максвеллом⁴⁾, как следствие электромагнитной теории света, а также Бартоли (1876), как следствие второго принципа термодинамики⁵⁾; эти теоретические исследования приводят к тождественному результату, что силы светового давления непременно должны существовать и что они связаны простым соотношением с количеством энергии (E), падающей в секунду в форме параллельных лучей на данное тело. Давление (p), производимое светом на поглощающую его поверхность тела, определяется так:

$$p = \frac{E}{v},$$

где v — скорость света.

Солнечные лучи на расстоянии земли от солнца давят на поглощающую поверхность в 1 м^2 с силой, равной весу $0,5 \text{ мг}$.

За последнее время удалось мне⁶⁾, а также Никольсу и Гуллю⁷⁾ непосредственными лабораторными опытами конста-

1) E. Lommel, Wied. Ann. 19, 355 (1883).

2) E. Wiedemann und G. C. Schmidt, Wied. Ann. 56 18 (1895); 57, 447 (1896).

3) F. Zöllner, Über die Natur die Kometen, p. 198, Leipzig, 1872.

4) J. C. Maxwell, Treatise on Electricity and Magn., § 792, 1873.

5) A. Bartoli, Nuovo Cimento 15, 195 (1883).

6) P. Lebedew, Ann. d. Phys. (4) 6, 433 (1901), а также Ж. Р. Ф. X. O. 33, стр. 53, 1901; см. выше стр. 151 — 180.

7) F. Nichols and Hull, Physic. Rev. 13, 307 (1901).

тировать действительное существование светового давления, причём соотношение, данное Максвеллом и Бартоли, оказалось *количественно* имеющим место.

Задолго перед тем, как появились эти опытные исследования, Фитцджеральд¹⁾ уже приложил теоретические исследования Максвелла к объяснению отступлений от ньютоновского закона всемирного тяготения в случае движения комет; но он сделал при этом принципиальную ошибку: он распространил добытые им результаты на отдельные молекулы кометных хвостов, не приняв во внимание, что выводы Максвелла относятся только к телам, размеры которых велики по сравнению с длиной волн падающих на них лучей. От этой ошибки свободны соображения, высказанные одновременно Лоджем²⁾ и мной³⁾ относительно отталкивательной силы солнца, а также соображения, сделанные мной⁴⁾ относительно деформаций и исчезновений кометных ядер, тогда как Аррениус⁵⁾, развивая основы своей теории солнечной короны, снова сделал эту ошибку.

Общее притягательное действие солнца (F) на шаровидное тело, размеры которого велики сравнительно с длинами волн падающих на него солнечных лучей, может быть выражено в гравитационных единицах следующим образом⁶⁾:

$$F = 1 - \frac{10^{-4}}{r\delta},$$

1) Fitzgerald, Proc. Roy. Soc. Dublin 3, 344 (1883).

2) O. Lodge, Nature, Sept. 1891, p. 454.

3) P. Lebedew, Wied. Ann. 45, 292 (1892), см. выше, стр. 60—65.

4) P. Lebedew, Rapports présentés au Congrès International de Physique à Paris, 2, p. 133, 1900; Ж. Р. Ф. Х. О. (ч. физ.) 32 (1), стр. 211—217, 1900. В прим. к стр. 216 говорится следующее: «Частицы ещё меньшие или отдельные газовые молекулы солнце будет, вероятно, *отталкивать*, но как подсчёты Максвелла-Бартоли, так и наши опыты относятся только к случаю, когда тело велико сравнительно с длиной волны падающих на него лучей».

5) S. Arrhenius, Phys. Zeitschr. 2, 81 (1900).

6) P. Lebedew, Wied. Ann. 45, 294 (1892); см. выше, стр. 62. На нешарообразные тела солнечные лучи оказывают большее давление, так как у них отношение поверхности к объёму больше.

где r — радиус шара, выраженный в *см*, а δ — плотность тела (по отношению к воде).

Отсюда сразу видно, что для тела, размеры которого более 1 *м*, отступления от ньютоновского закона всемирного тяготения исчезают в пределах ошибок наблюдений самых точных астрономических измерений. Если кометное ядро состоит из роя метеоритов, размеры которых меньше 1 *см*, то при выгодных условиях наблюдения кометы отступления от закона Ньютона как раз ещё можно обнаружить; если размеры метеоритов роя ещё меньше, то отступления от упомянутого закона будут соответственно больше. Можно, однако, и наоборот утверждать, что в том случае, когда отступлений от закона Ньютона не наблюдается и предел ошибок наблюдений известен, размеры метеоритов кометного ядра *не могут быть меньше* известной величины.

В том случае, когда кометное ядро представляет собой рой достаточно малых метеоритов, размеры которых неодинаковы, это кометное ядро будет непрерывно деформироваться и расплываться, что при периодических кометах должно сказаться особенно сильно. Обычным способом наперёд вычисленная из имеющихся наблюдений дальнейшая орбита должна очень сильно расходиться с орбитой, впоследствии наблюдаемой; может быть, этим способом можно объяснить особенности в явлениях движения Бьелидов.

На пылинки, размеры которых измеряются тысячными долями миллиметра, и которые, следовательно, сравнимы с длинами волн падающих на них лучей солнца, приведённая выше формула не может быть распространена: Шварцшильд ¹⁾ показал, что в этом случае отталкивательная сила солнца при известных размерах пылинок достигает максимальной величины и затем быстро падает при дальнейшем уменьшении их размеров.

Когда солнечные лучи падают на отдельные молекулы газа, то в этих последних имеет место явление резонанса, сопровождаемое давлением падающих на них лучей, что

¹⁾ K. Schwarzschild, Ber. d. Münch. Akad. d. Wiss. 1901, p. 293.

мною ¹⁾ было указано. В этой области, которая представляет собой наибольший интерес для астрофизики, необходимо ещё ожидать появления соответствующих непосредственных экспериментальных исследований.

Обращаясь к истории развития наших представлений о физической причине отступлений от ньютонова закона всемирного тяготения, мы видим, что то представление о ней, которое три столетия тому назад высказал Кеплер и которое сперва было оттеснено гипотезой «всплывания» Ньютона, а затем электрической гипотезой Ольберса, в настоящее время снова выступает на передний план, опираясь теперь, с одной стороны, на теоретические обоснования Максвелла и Бартоли, а с другой — на непосредственные опытные исследования. Представление Кеплера является нам сейчас в форме физически обоснованной теории: мы должны теперь утверждать, что солнце обладает отталкивательной силой; из наших лабораторных опытов мы знаем, как велики силы давления, производимого светом на разные тела, и можем наперёд количественно указать то отступление от закона Ньютона, которое непременно должно существовать, и разобратить те следствия, которые отсюда проистекают.

Вопрос о том, существуют ли электрические силы, которые в том или другом случае обуславливают заметные отступления от закона Ньютона, — этот вопрос в настоящее время является открытым: только после того, как мы количественно приняли в расчёт силы светового давления, которые безусловно существуют, и выделили их, только тогда мы можем дать себе отчёт, существует ли ещё какая-нибудь добавочная сила, которая заставляла бы нас делать новые гипотезы, или же представление Кеплера исчерпывает все особенности наблюдаемого отступления от закона Ньютона.

¹⁾ P. Lebedew, Wied. Ann. 62, 170—172 (1897); см. выше, стр. 149. В случае газов величина светового давления равняется количеству поглощённой энергии, разделённой на скорость света; отношение между коэффициентом поглощения и массой газа очень различно для различных газов.





ТЕРМОЭЛЕМЕНТЫ В ПУСТОТЕ, КАК ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ.

В одном из прежних исследований относительно коротких электрических волн¹⁾ я обратил внимание на то, что термоэлемент, находящийся в пустоте, обнаруживает при освещении значительно большую чувствительность, чем в воздухе.

Это явление без труда объясняется уменьшением в пустоте способности тел терять тепло, согласно наблюдениям Кундта и Варбурга²⁾. На более выгодное использование болометра в пустоте мимоходом указывал Вин³⁾, а в последнее время Kempf-Hartmann'ом⁴⁾ было исследовано в пустоте расширение проволоки теплового гальванометра.

Значительные практические выгоды термоэлементов в пустоте побудили меня вновь предпринять их исследование и провести его количественно. Это исследование охватывает как термоэлементы, которые по Nobili-Melloni (1835) служат для измерений со световыми и тепловыми лучами, так и такие термоэлементы, которые по Клеменчичу⁵⁾ употребляются для измерения электрических колебаний.

При всех исследованиях для выкачивания воздуха служил насос Кальбаума. При самых высоких разрежениях

1) P. Lebedew, Wied. Ann. 56, 12 (1895); см. выше, стр. 78.

2) A. Kundt und E. Warburg, Pogg. Ann. 156, 203 (1875).

3) W. Wien, Ann. d. Phys. 5, 425 (1901).

4) Kempf-Hartmann, Physik. Zeitschr. 3, 109 (1901).

5) I. Klemenčič, Wied. Ann. 42, 416 (1891); 45, 78 (1892).

остаток воздуха вытеснялся парами ртути, которые потом конденсировались при помощи твёрдой углекислоты¹⁾. Я позволяю себе здесь подчеркнуть, что к системе, из которой выкачивается воздух, необходимо должен быть присоединён осушающий сосуд с фосфорным ангидридом, так как следы водяного пара в вакууме уже сильно влияют на результаты²⁾.

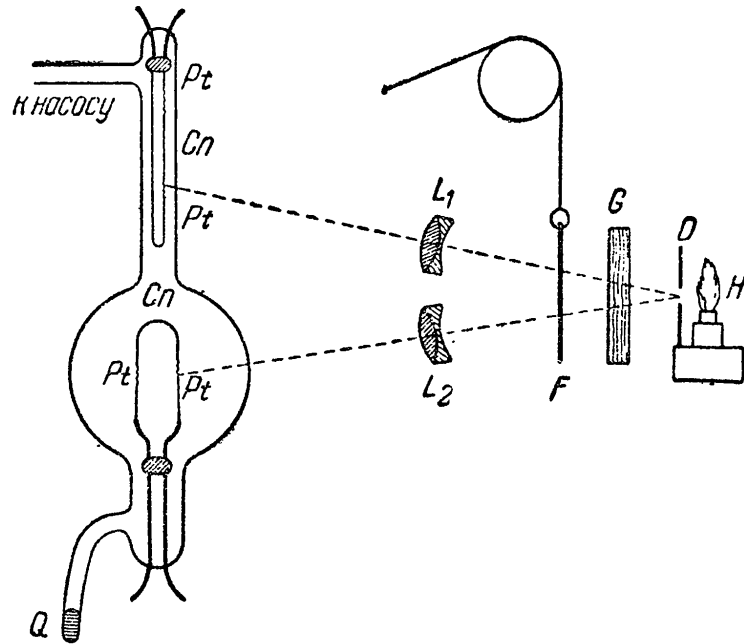


Рис. 49.

Рис. 49 изображает два термоэлемента для измерения лучистой энергии. Термоэлементы *платина-константан* были скручены из проволок 0,025 мм в диаметре³⁾, платиновые концы были обвиты вокруг толстых платиновых подводок, а места, в которых были скручены проволочки, были гальванически покрыты платиновой чернью. Один термоэлемент находился в узкой стеклянной трубке ($d = 8$ мм), другой в стеклянном шаре ($D = 5$ см). На этих термоэлементах можно было исследовать влияние раз-

¹⁾ Подробности относительно аппаратов и обращения с ними ср. мою работу в *Ann. d. Phys.* 6, 444 (1901); см. выше, стр. 163—164.

²⁾ Ср. также А. Кундт и Е. Варбург, цит. выше, стр. 202.

³⁾ Получены от Hartmann u. Braun, Франкфурт-на-М.

меров сосуда. Свет, который выходил из маленькой диафрагмы, освещённой лампой Гефнера H^1), проходил через толстую стеклянную пластинку G и мог быть закрыт при помощи подвижной ширмы F . При помощи линз L_1 и L_2 два действительных изображения диафрагмы концентрировались на одном из спаев термоэлементов. При помощи переключателя (не показанного на рис. 49) или один или

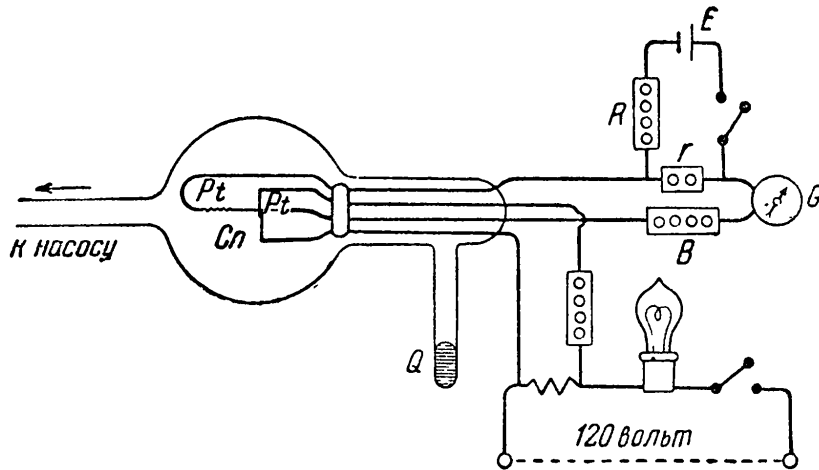


Рис. 50.

другой из термоэлементов мог включаться в цепь чувствительного гальванометра. В боковом придатке находилась капля ртути Q . Придаток можно было нагревать или охлаждать.

Рис. 50 представляет термоэлемент в пустоте, предназначенный для измерения электрических колебаний.

Термоэлемент сделан из *платиновых* и *константановых* проволок ($d = 0,025$ мм). Отклонение от первоначальной формы по Клеменчичу (цит. выше) заключается лишь в том, что тонкая константановая проволока соединена в цепи гальванометра не прямо с толстой платиновой подводкой, а через посредство тонкой промежуточной платиновой проволоки: таким способом было уничтожено движение нулевой точки, происходящее от медленного теплового обмена в подводящих проводах. Весь аппарат был впаян

¹⁾ Чтобы избежать колебания пламени лампы Гефнера, на неё был надет маленький цилиндр из металлической сетки.

в стеклянный шар ($D = 3$ см); в боковом придатке находилась капля ртути.

Нагревающий переменный ток (50 периодов) доставлялся городской центральной станцией и ослаблялся при помощи ответвлений и соответствующих балластных сопротивлений. Чувствительность гальванометра могла быть соответственно уменьшена (при сильном разрежении) при помощи балластного сопротивления B и измерена обычным способом при *каждом* ряде наблюдений, для чего устраивалось ответвление от нормального элемента E посредством сопротивлений R и r .

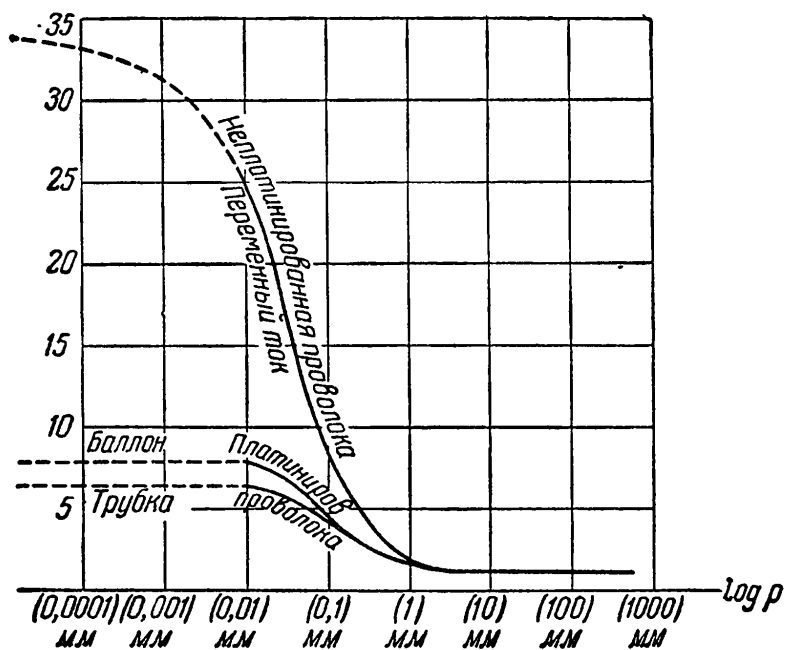


Рис. 51.

При всех исследованиях нагревание как при помощи освещения, так и при помощи переменного тока всегда производилось в продолжение одной минуты с последующими перерывами в одну минуту. При этом наблюдались *стационарные* отклонения гальванометра. Все наблюдения начинались и оканчивались при атмосферном давлении: отклонения гальванометра для этого давления служили *единицей чувствительности* для данного термоэлемента.

¹⁾ Отсчёт по Mc-Leod-Kaibbaum'овскому измерителю давлений.

Для каждого термоэлемента отдельные наблюдения различных рядов редуцировались к постоянной чувствительности гальванометра, затем наносились на ту же координатную бумагу и соединялись непрерывной кривой ¹⁾. Результаты этих исследований приведены на рис. 51, где в качестве ординат нанесены отклонения гальванометра, а за абсциссы для большего удобства приняты логарифмы давлений ²⁾.

Давление, мм	Платинир. элем. (освещение)		Неплатинир. элем. (переменный ток)
	шар	трубка	
760,0	1		1
5,0	1		1
0,7	2		2
0,2	3		6
0,07	5	4,5	10
0,01	7	5,5	25
0,0001 ¹⁾	7,4	6,0	33
Охлаждение тверд. CO ₂	7,4	6,0	34

Приводимая таблица представляет взятые из кривых результаты, которые имеют значение для изготовления термоэлементов.

Из рис. 51 и из таблицы можно усмотреть следующее:

а) В области от одной атмосферы до 5 мм давления чувствительность не изменяется.

б) Для меньших давлений чувствительность быстро возрастает с разрежением и достигает своего практического максимума около 0,01 мм, т. е. при таком давлении, при котором применение вмазанных окошек для пропускания ис-

¹⁾ Все ряды наблюдений совпадали между собой в пределах 50%.

²⁾ Кривые, начиная от давлений ниже 0,01 мм, приведены лишь пунктиром, так как в этой области давления не могут быть определены с достаточной точностью.

следуемых лучей не представляет затруднения. Чувствительность возрастает в 7 раз для зачернённых и в 25 раз для незачернённых термоэлементов.

с) Для разрежений, которые лежат ниже 0,01 мм, как это можно получить при помощи ртутного насоса и охлаждающих смесей, чувствительность растёт сравнительно так медленно, что применение этих более высоких разрежений не представляет значительных практических выгод.

Повышенная чувствительность термоэлементов в пустоте и одновременно наблюдающаяся значительно большая устойчивость их дают возможность приняться за ряд таких исследований в области электромагнитных колебаний, к которым до сих пор нельзя было приступать.

Физическая лаборатория Университета.
Москва, июнь, 1902.





ОПЫТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДАВЛЕНИЯ СВЕТА НА ГАЗЫ.

§ 1. Характерные особенности форм кометных хвостов уже триста лет тому назад заставили великого Кеплера¹⁾ высказать предположение, что солнечные лучи производят давление на газообразные вещества, испаряющиеся при прохождении через перигелий в головной части кометы, и заставляют их двигаться прочь от солнца.

Фитцджеральд²⁾ в своё время старался обосновать это предположение Кеплера, исходя из максвелловского светового давления. Для того чтобы подсчитать величину сил, действующих в этом случае, Фитцджеральд сначала сделал предположение, что, во-первых, молекулы вещества кометных хвостов суть абсолютно чёрные шары, а во-вторых, что давление, которое производит свет на эти маленькие шары, по существу не отличается от того давления, которое он производит на шары гораздо больших размеров.

Что это последнее предположение не имеет места в случае очень малых шаров, для которых явления диффракции играют первенствующую роль, было выяснено Шварцшильдом³⁾, который и указал способ точного подсчёта сил давления света на абсолютно отражающие шары любых

¹⁾ J. Kepler, De Cometis. Augustae Vindelicorum, 1619. Opera omnia. Edit. Dr. Ch. Frisch. 7, p. 110. Frankforti a/M. 1868.

²⁾ G. Fitzgerald, Proc. Roy. Soc. Dublin 3, 344 (1883).

³⁾ K. Schwarzschild, Sitzber. d. Münch. Ak. d. Wiss. Math. Kl. 31, 293 (1901).

размеров; недавно Дебай¹⁾ нашёл общее решение этой задачи для шаров из вещества, отражающего, преломляющего и поглощающего падающие на них лучи света.

Я в своё время²⁾ обратил внимание на недопустимость предположения, будто можно без всяких оговорок переносить рассуждения, касающиеся шаров, на молекулы газа; я указывал, что молекулы газов мы должны рассматривать как отдельные резонаторы, обладающие определённым избирательным поглощением.

Опыты, которые я³⁾ делал с акустическими резонаторами, показали, что увлекающее действие падающей волны на звуковой резонатор представляет собой резко выраженное и легко наблюдаемое явление, а подсчёт (там же, стр. 170 или выше, стр. 144—146), который я сделал для электромагнитных волн, позволял предвидеть аналогичное действие световых волн на отдельные молекулы газов. Дебай в вышеуказанной работе (см. стр. 97) подробно рассмотрел действие светового давления на схематическую модель молекулы (колеблющийся диполь), находящуюся в тех же условиях, как молекула газа кометного хвоста.

§ 2. При экспериментальном исследовании светового давления на газовые молекулы приходится иметь дело не с отдельными молекулами, а с определённым слоем газа, действие на который складывается из действия света на отдельные его молекулы; в этом случае слагающую всех действующих сил легко определить, как это и было указано Фитцджеральдом (см. стр. 345), если исходить из того простого предположения, что только те лучи могут производить максвелловское световое давление, которые поглощаются данным газом и по отношению к которым слой газа является чёрным телом: сила p , с которой пучок параллельных лучей стремится увлечь газ в направлении движения света, т. е. сила p , с которой свет давит на слой газа,

$$p = \frac{\alpha E}{V},$$

¹⁾ P. Debye, Ann. d. Phys. 30, 57 (1909).

²⁾ P. Lebedew, Wied. Ann. 45, 297 (1892); см. выше, стр. 65.

³⁾ P. Lebedew, Wied. Ann. 62, 168 (1897); см. выше, стр. 146—149.

где α — коэффициент абсорбции слоя газа для лучистой энергии, E — количество этой энергии, падающей на слой газа в течение 1 секунды, V — скорость распространения света.

Оптически задача сводится к тому, чтобы найти те силы давления, которые свет производит на однородную плоско-параллельную пластинку, частично поглощающую лучи, но не отражающую их в заметной степени. Эту задачу теоретически исследовали Д. А. Гольдгаммер¹⁾ и Дебай (цит. выше, стр. 82).

Силы светового давления были экспериментально изучены мной²⁾ для случая отражающих, поглощающих и прозрачных тел, Никольсом и Гуллем³⁾ для случая серебряного зеркала, Пойнтингом⁴⁾ для случаев косвенного падения и полного внутреннего отражения. Благодаря этим исследованиям основное предположение Кеплера о том, что свет давит на отдельные молекулы газа, становится на твердую почву; поэтому его теория кометных хвостов и вошла так прочно в современную астрофизику. Аррениус⁵⁾ указал на то крупное значение, которое силы светового давления должны иметь в известных вопросах космической физики. По этим соображениям я решил экспериментально изучить пондеромоторное действие света на газы, чтобы подвинуть наши знания о максвелловских силах и в этом направлении.

I. Метод исследования.

§ 3. Когда пучок белого света проходит через толщу газа, обладающего избирательным поглощением, то лучи света, производя давление на отдельные молекулы, должны заставлять всю массу газа двигаться в направлении

¹⁾ D. Holdhammer, Ann. d. Phys. 4, 834, 846 (1901).

²⁾ P. Lebedew, Ann. d. Phys. 6, 433 (1901); см. выше, стр. 151

³⁾ E. Nichols und G. H. Hull, Ann. d. Phys. 12, 225 (1903).

⁴⁾ J. H. Poynting, Phil. Mag. (6) 9, 169, 393 (1905).

⁵⁾ Arrhenius, Phys. Zeitschr. 2, 81, 97 (1900). См. также Lehrbuch d. Kosmischen Physik, Leipzig, 1903, и Образование миров, Одесса, 1903.

распространения света. Так как коэффициенты поглощения у газов очень незначительны, то и силы, с которыми свет двигает газ, очень малы и даже при наиболее выгодных условиях опыта едва достигают сотой доли того давления,

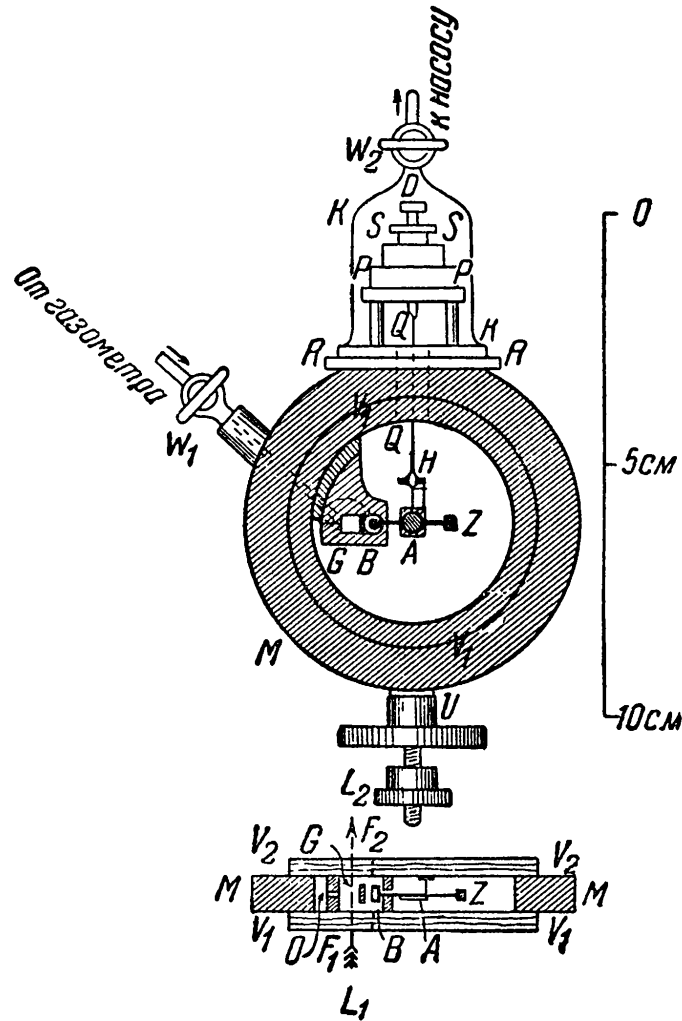


Рис. 52.

которое тот же пучок света производил бы на чёрную поверхность. Чтобы иметь возможность измерять эти малые силы, опыт располагался таким образом, что газ свободно мог перемещаться в направлении пронизывающих его лучей и производил давление на очень чувствительный поршневой аппарат, на который лучи света непосредственно действовать не могли. На рис. 52 изображён прибор, служивший для этих исследований: исследуемый газ заполняет объём G

(окна которого F_1 и F_2 из флуорита), и пучок света L_1L_2 пронизывает его, не попадая на окружающие стенки. Лучи света производят давление на отдельные молекулы газа и заставляют газ перемещаться в направлении пучка лучей, благодаря чему между окнами F_1 и F_2 образуется некоторая разность давлений газа; эта разность давлений стремится выравняться через неосвещённый боковой канал, в котором находится легко подвижный поршень B ; поршень B прикреплен к коромыслу T чувствительных крутильных весов, которые закручиваются, как только на поверхностях поршня устанавливается некоторая разность давлений газа¹⁾. Общее количество подходящей энергии можно измерить калориметрически, коэффициент поглощения — с помощью двух термоэлементов (см. ниже § 8). Если диаметр поршня, длина плеча коромысла, величина направляющей силы кварцевой нити Q и расстояние скалы от зеркала известны, то нетрудно вычислить в абсолютной мере ту разницу давлений газа, которой соответствует отклонение коромысла на одно деление скалы. Тогда возможно количественно проверить основной закон Фитцджеральда. В описанном приборе одно деление скалы соответствует $1,4 \times 10^{-6}$ дин/см².

§ 4. Экспериментальное выполнение этих опытов встречает трудности двоякого рода:

а) Свет давит только на те газы, которые его избирательно поглощают, причём величина этого поглощения не одинакова в разных слоях газа: передние слои газа поглощают (и нагреваются) сильнее задних, для которых первые служат светофильтром; при этих условиях в массе газа образуются разности плотностей, вызывающие конвекционные токи, которые в свою очередь могут влиять на показание поршневого аппарата. Указанные разности плотностей меняют своё распределение вместе с изменением направления светового пучка, и потому они могли бы обуславливать

¹⁾ Отверстие O устроено для того, чтобы дать выход газу при внезапном освещении и нагревании. На величину образующихся разниц давления и соответственных отклонений поршня B это отверстие O не влияет.

постоянные ошибки в измерениях абсолютных величин давления. Систематические исследования этого источника ошибок позволяют, однако, установить, что при правильной установке прибора этих постоянных ошибок можно избежать; опыты показали также, что и при значительных неправильностях в установке прибора указанные ошибки очень малы для смесей испытываемых газов с водородом, почему и все окончательные измерения были сделаны с такими смесями (см. ниже §§ 15 и 16).

б) Те простые соотношения, которые Фитцджеральд указал для пучка параллельных лучей, не поддаются непосредственному экспериментальному исследованию, так как в этом случае энергия светового пучка слишком мала, и нам приходится (как указано выше) пользоваться пучком сходящихся лучей, в котором слой газа пронизывается лучами *неравномерно*: внутри самого газового слоя образуются разности давлений, которые частью выравниваются в самом газе, и строгий количественный подсчёт того давления, которое газ производит на поршень прибора, является невозможным (см. ниже § 23) — приходится *приблизительно* оценивать величины этих пертурбирующих сил, и потому *подсчёт абсолютной величины давления* из измеренных величин α и E не может быть точным. Отдельные измерения E , α и p можно произвести без систематических ошибок, с точностью около $10^0/0$; но абсолютное значение констант, вследствие указанных выше причин, не может претендовать на ту же степень точности, и потому соотношение, указанное Фитцджеральдом, количественно не может быть проверено точнее, чем в пределах *тридцати* процентов. Я решил ограничить эту проверку указанной степенью точности, так как её достаточно для решения основного вопроса о существовании светового давления на газы, а получение более точных цифровых данных представляет собой задачу огромной экспериментальной трудности¹⁾.

¹⁾ Позволю себе заметить, что и настоящая работа заняла более трёх лет времени, в течение которых было построено и исследовано более двадцати поршневых приборов разных типов.

II. Приборы.

§ 5. *Поршневой прибор* (рис. 52) состоял из латунного плоско-полированного тела толщиной около 7 мм; внутри его помещалось газовое пространство G (3×4 мм), высверлённое отверстие для поршня и вырез для коромысла крутильных весов; просвет был герметически закрыт двумя стеклянными пластинками V_1 и V_2 , которые были примазаны к латуни салом, употребляемым для смазки кранов, и прижимались каждая тремя зажимами, не показанными на рисунке. Против выреза G стеклянные пластинки просверлены; отверстия закрыты вмазанными флуоритовыми пластинками F_1 и F_2 ; последние сделаны заподлицо со стеклянными пластинками. На тело MM напаяна латунная же пластинка RR , на которой надет (смазка салом) стеклянный колокол KK . Под колоколом находится приспособление для подвешивания кварцевой нити (QQ). С помощью винта D можно нить подымать, опускать и вращать. Винт D стоит на крестовом суппорте $SSPP$, и потому можно также передвигать нить по направлению лучей и по перпендикулярному направлению и закреплять её в любом положении.

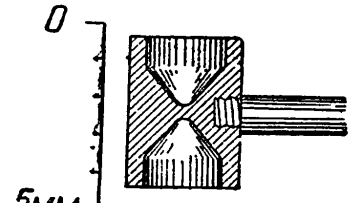


Рис. 53.

Подвижный поршень (рис. 53, в увеличенном виде) был выточен из магнелия; при 4 мм длины и 2,85 мм диаметра он весил $< 0,03$ г; в него крепко ввинчивалось алюминиевое коромысло. Поршень свободно двигался внутри цилиндрического отверстия диаметром в 3,25 мм. Чтобы избежать притяжений, обусловленных эффектом Вольты, в цилиндрическое отверстие была вделана накрепко муфта из магнелия. Коромысло крутильных весов (рис. 52) несло на себе противовес Z и зеркало для отсчётов A ; оно привешивалось на крючок H кварцевой нити. Посредством соответственного передвижения точки подвеса легко было центрировать поршень в муфте.

Через стеклянный кран W_1 , вмазанный сургучом, можно было вводить в поршневой прибор воздух или испытуемый газ; кран W_2 служит для выхода. Зажим V служит

для укрепления поршневого прибора на осветительном приборе.

§ 6. *Осветительный прибор* (рис. 54, в плане) состоял из солидного Т-образного железного постаментов с установочными винтами; на нём был укреплен горизонтальный нер-

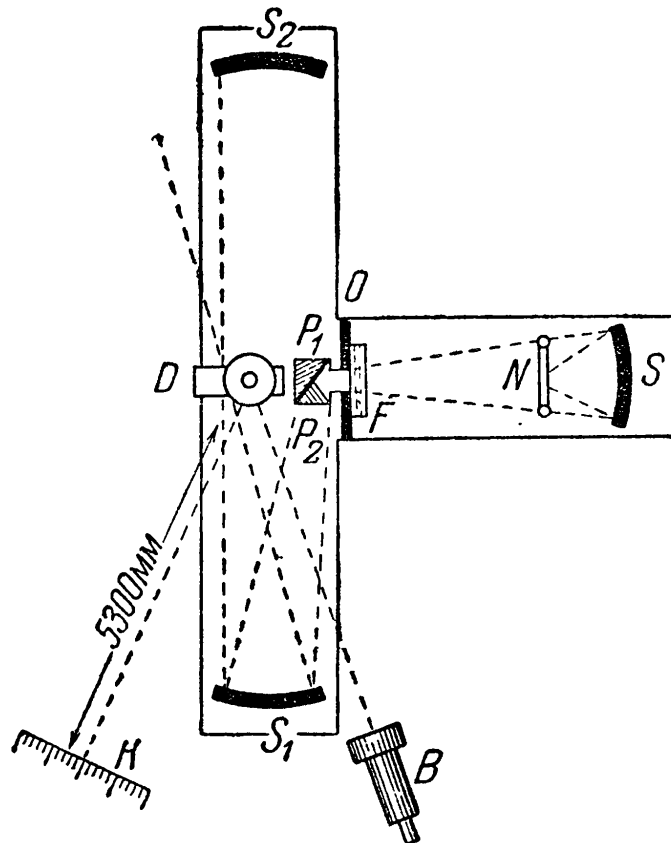


Рис. 54.

стовский штифт (1 *амп*) *N*. Он питался от аккумуляторной батареи института; его постоянство особо контролировалось включёнными в цепь прецизионными вольтметром и амперметром. Посеребрённое спереди вогнутое зеркало *S* ($r \doteq 12$ см, $d = 10$ см) бросало увеличенное изображение штифта на прямоугольную диафрагму *O* (2×3 мм). Флуоритовая пластинка *F* толщиной в 8 мм ставилась на пути лучей и задерживала все лучи, которые в заметной степени могли быть поглощены на дальнейшем пути в окошках поршневого прибора *D*. Из диафрагмы *O* лучи шли на посеребрённую поверхность призмы *P*₁, отражались ею на

вогнутое зеркало S_1 и давали действительное изображение диафрагмы в газовом пространстве поршневого прибора D , и притом так, что все лучи шли по газу, не попадая на стенки прибора. Пользуясь особым (не показанным на чертеже) пневматическим приспособлением, наблюдатель мог простым нажатием на резиновую грушу мягко, без сотрясения прибора, подымать столик, на котором укреплены призмы P_1 и P_2 ; тогда свет вместо призмы P_1 падает на P_2 и отражается зеркалом S_2 в поршневой прибор с противоположной стороны. Зеркала S_1 и S_2 были диаметром в 10 см, с радиусом кривизны 40 см. Оправы, служащие для тонкой установки зеркал S , S_1 и S_2 и призм, не показаны на чертеже.

Через трубу B и плоское зеркальце поршневого прибора наблюдалась скала K , находившаяся в 5,3 м расстояния.

§ 7. Скала должна освещаться очень сильно, чтобы глаз без утомления переносил долгие ряды наблюдений; на стеклянной линейке был осаждён непрозрачный слой платины, а в последнем нарезаны миллиметровые деления M (рис. 55). Последние освещались сзади нернстовским штифтом N с помощью конденсатора C . Конденсатор давал сильно увеличенное изображение штифта на зеркальце A поршневого аппарата. При таких условиях освещение было настолько ярко, что его приходилось в должной мере ослаблять пластинкой зелёной желатины. Плоское зеркальце ($d = 5$ мм) было настолько совершенно, что замечавшееся уширение отдельных делений зависело исключительно от дифракционных явлений; отсчёты можно было без затруднения и с полной уверенностью делать с точностью до $\pm 0,1$ мм.

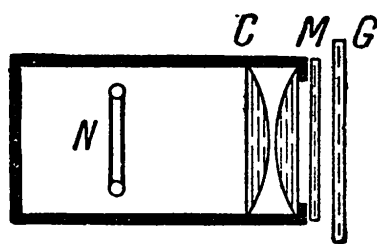


Рис. 55.

§ 8. Термоэлементы, служившие для измерения коэффициентов абсорбции газа, были сделаны из платиновых и константановых проволок толщиной 0,02 мм, покрытых платиновой чернью и прикреплённых эбонитовыми рамками к поршневому прибору (на рис. 52 они не показаны). Термоэлементы были соединены, по Пюгген-

дорфу¹⁾, последовательно (рис. 56) и замкнуты постоянным сопротивлением K (10 омов) и переменным прецизионным сопротивлением P . Гальванометр D был типа д'Арсонваля.

Обозначим через α коэффициент абсорбции газа, через r — сопротивление термоэлемента T_2 и через R_e и R_g — сопротивления прецизионного реостата P , когда прибор наполнен воздухом и испытуемым газом (при отклонении гальванометра = 0); тогда

$$\alpha = \frac{R_e - R_g}{R_e + r}.$$

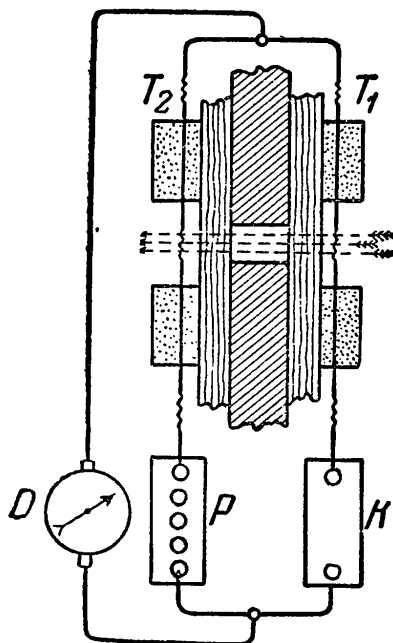


Рис. 56.

§ 9. *Калориметр*, служивший для измерения энергии лучей, проходивших через поршневой прибор, был построен по образцу того, который я применял в своих более ранних исследованиях о силах светового давления²⁾. При этом водяная защита была заменена массивной медной оболочкой H (вес — 1660 г) (рис. 57); пары эфира, служившего для охлаждения калориметра, откачивались насосом. Обо-

лочка была защищена ватой и эбонитом от резких изменений температуры. Водяной эквивалент покрытого спереди платиновой чернью медного цилиндра K , термометрического шарика и налитой в цилиндр ртути достигал 6,36 г. Температура калориметра и оболочки определялась двумя одинаковыми термометрами с делениями на десятые доли градуса; термометры погружались в соответственно просверленные отверстия, наполненные ртутью. Отсчёты делались с помощью двух труб. Калориметр можно было без труда устанавливать на постаменте осветительного прибора, вплотную за поршневым прибором.

¹⁾ Ср. J. Bosscha, Pogg. Ann. 94, 172 (1855).

²⁾ P. Lebedew, Ann. d. Phys. 6, 445 (1901); см. выше, стр 165.

§ 10. Газы: воздух, метан, пропан, бутан, этилен и ацетилен получались из газометров, углекислота и водород — из кипповских аппаратов. Для приготовления водо-

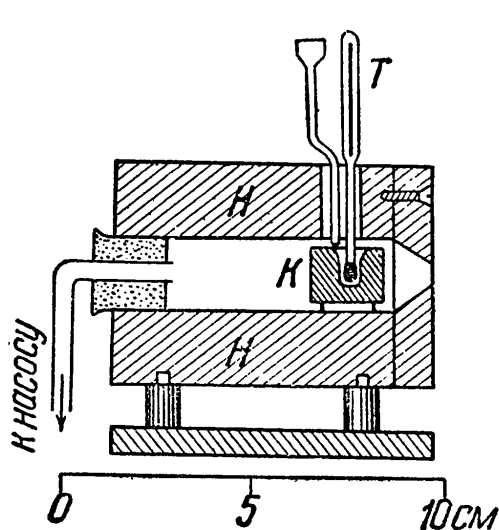


Рис. 57.

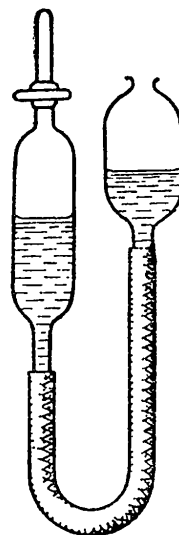


Рис. 58.

родных смесей служила пипетка (рис.58) объёмом в 500 см^3 ; запирающей жидкостью служила вода.

III. Предварительные опыты.

§ 11. При производстве опытов, имеющих целью обнаружить пондеромоторные силы света на молекулы газа, выступают на первый план те побочные силы, которые зависят от конвекции; небольшой расчёт показывает, что в газовой массе, имеющей в высоту всего несколько миллиметров, уже разница в температуре на тысячные доли градуса Цельсия влечёт за собой такие разницы плотностей, которые могут вызвать разницы давлений того же порядка, как и измеряемые силы давления света. Поэтому вертикальные размеры поршневого прибора (рис. 52) были выбраны настолько малыми, насколько это только допустимо по практическим соображениям: граница здесь достигается довольно скоро, так как при уменьшении размеров очень быстро растёт трение газа, и коромысло крутильных весов даже при сравнительно очень больших направляющих силах является переаперiodизированным. Наиболее благоприятные

размеры прибора (рис. 52) были получены путём опыта, для чего пришлось в течение исследования построить и внимательно испробовать *более 20 аппаратов* разных форм и величин. Чтобы определить, насколько описанный выше прибор (фиг. 52) позволяет измерить силы светового давления без систематических ошибок, нужно было также изучить прибор с этой стороны.

§ 12. *Выбор газов для исследования.* Удобными для исследования оказались: *углекислота* (CO_2) и углеводороды: *метан* (CH_4), *этилен* (C_2H_4), *ацетилен* (C_2H_2) и в особенности отличающиеся своим высоким поглощением: *пропан* (C_3H_8) и *нормальный бутан* (C_4H_{10}). За приготовление последних двух газов я выражаю и здесь мою признательность моему товарищу проф. Н. Д. Зелинскому. Исследование других газов пришлось отбросить, так как они или обладали очень малой поглощательной способностью, или могли химически действовать на поршневой прибор.

При долгих предварительных опытах, которые были предприняты для выработки соответственной формы поршневого прибора, применялись те газы, которые легче всего получаются: ацетилен, углекислота и светильный газ. При этом обнаружился замечательный результат, а именно: силы давления, измеренные для светильного газа, давали в различных приборах сходящиеся величины, тогда как для углекислоты и ацетилена полученные значения колебались в широких пределах между положительными и отрицательными величинами. Возникла мысль объяснить эту особенность светильного газа его сравнительно гораздо большей теплопроводностью, что обуславливается примесью *водорода*: при чистом газе (ацетилен, углекислота) проникающие через него лучи нагревают его очень неравномерно, так как лучи поглощаются преимущественно на первых же слоях; так как в то же время их тепловая отдача мала, то в газе возникают вариации плотностей и связанные с ними конвекционные токи. Последние действуют на поршень поршневого прибора, и направление и величина этого действия не поддаются никакому учёту. Но если подмешивать к такому газу *водород* (см. ниже, §§ 16 и 17), то, с одной стороны, уменьшается абсолютная величина плотности, а с

другой стороны, в особенности сильно уменьшается неравномерность нагревания благодаря увеличению теплопроводности. Таким образом устраняются вредные вариации в плотностях газа. Только этот приём позволил смирить силы светового давления, действующие на газ, с надлежащей уверенностью и вне зависимости от посторонних возмущений. Пришлось, следовательно, ограничиться исследованием водородных смесей названных выше газов.

§ 13. *Точность измерения отклонений.* Так как трение газа было довольно велико, то нужно было задать кварцевой нити не особенно маленькую направляющую силу; наиболее подходящей оказалась такая сила, при которой система с поршнем двигалась аperiodически, достигая окончательной установки в 30 сек. Благодаря сильному трению в газе наблюдаемая в трубу скала при 5,3 м расстояния представляется совершенно неподвижной; благодаря же хорошим качествам зеркала и сильному освещению делений шкалы можно было без всяких затруднений, с полной уверенностью отсчитывать десятые доли делений. Медленное передвижение нулевой точки, являющееся следствием медленного изменения температуры закутанного в вату поршневого прибора, практически скорей помогает наблюдениям, так как при нём последовательные отсчёты падают каждый раз на новые места скалы, что предохраняет от систематических ошибок при оценке на глаз десятых долей деления.

Измеренные величины отклонений лежали между 0,3 и 0,25 делений скалы¹⁾. При этих исключительно малых отклонениях приходилось делать целые ряды наблюдений (31 отсчёт, через каждые 30 сек.). Из прилагаемого примерного протокола наблюдений (см. ниже, § 20) и из сопоставления результатов (см. ниже, § 24) явствует, что среднее уклонение отсчёта от средней величины лежит ниже, чем $\pm 0,1$ деления, а вероятная ошибка целого ряда наблюдений ниже $\pm 0,05$ деления скалы. Таким образом

¹⁾ Применение света дуговой лампы позволяет увеличить эти отклонения приблизительно в 10 раз. Но при сильных колебаниях света дуги совершенно невозможны измерения абсорбции, и потому такие опыты не годятся для количественных измерений.

даже и эти маленькие отклонения измеряются с точностью по крайней мере $10^0/0$, что совершенно достаточно ввиду той точности окончательного результата, которая была поставлена целью.

§ 14. *Установка приборов.* Поршневой прибор привинчивался к осветительному прибору (рис. 54), и оба зеркала S_1 и S_2 устанавливались так, что действительное изображение диафрагмы приходилось внутри газового пространства G (рис. 52), не задевая стенок прибора. Для того чтобы не могли попасть на поршень лучи, отражённые вовнутрь флуоритовыми пластинками, зеркала S_1 и S_2 устанавливались таким образом, что поршень лежал на прямой, соединяющей концы их горизонтальных поперечников (рис. 54). При таком положении зеркал лучи, отражённые флуоритовыми пластинками, получают такое направление, что не могут попасть на поршень; оптическая ось пучка образует при этом в горизонтальной плоскости угол около 7° с осью газового пространства.

Осветительный прибор с помощью установочных винтов ставится так, что верхняя и нижняя стенки газового пространства G (рис. 52) в поршневом приборе стоят приблизительно горизонтально. После этого, сняв стеклянный колокол KK , до тех пор перемещают с помощью суппорта точку привеса кварцевой нити (возможно движение вверх или вниз, во все стороны по горизонтали, вращательное), покуда поршень не ходит в своём отверстии свободно и центрально. Если теперь посмотреть вдоль оси поршня на какую-нибудь освещённую поверхность, то поршень кажется окружённым светлой кольцеобразной каймой.

Когда прибор наполнен воздухом или водородом, то при изменении направления лучей не замечается никаких отклонений поршня, выходящих за пределы $\pm 0,05$ деления скалы. Это доказывает, что прямое действие лучей на поршень исключено.

§ 15. *Наклон газового пространства в направлении пучка лучей* (рис. 59) имеет следствием, что газовая масса, нагреваемая падающими лучами, стремится кверху как более лёгкое тело, приходит, таким образом, в движение и давит на поршень. Так как среднее нагревание газовой массы не

зависит от направления падающих лучей, то проистекающие отсюда возмущения для обоих направлений лучей одинаковы как по величине, так и по направлению, и потому они могут быть исключены при измерении сил светового давления.

Чтобы составить себе представление о величине этих сил и об их действии, были проделаны следующие опыты: поршневой прибор наполнялся исследуемым газом или газовой смесью, а затем

1) можно было, вводя металлический экран, преграждать путь лучам, приходящим от зеркала S_1 (рис. 54), а унося экран — пускать лучи в газовое пространство *спереди*;

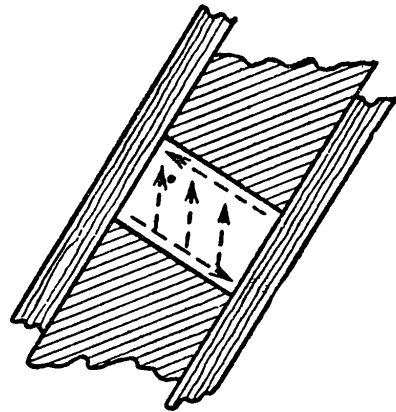


Рис. 59.

2) посредством пневматического приспособления двойное зеркало P_1P_2 подымалось кверху, закреплялось в этом положении, и затем металлическим экраном устранились лучи, приходившие от S_2 ; удаляя экран, мы пускаем свет в газовое пространство *сзади*;

3) поднятием и опусканием двойного зеркала P_1P_2 (с помощью того же пневматического приспособления) можно было также попеременно пускать лучи то спереди, то сзади.

В каждом случае производилось 11 отсчётов, следовавших друг за другом через каждые 30 сек. (в окончательных опытах — 31)¹⁾, и вычислялось среднее значение отклонений, а также средняя величина отступлений отдельных результатов от среднего значения.

При данном наклоне такие предварительные опыты проделывались поочередно с CO_2 (чистой), ацетиленом (чистым), $(0,5 \text{CO}_2 + 0,5 \text{H}_2)$ и $(0,5 \text{C}_2\text{H}_2 + 0,5 \text{H}_2)$.

Опыты производились для пяти различных наклонов; сначала нижняя стенка газового пространства устанавливалась *приблизительно* в горизонтальной плоскости; это положение принималось за нулевое. Производился ряд

1) О подробностях наблюдений и их подсчётов см. ниже, § 20.

наблюдений; после этого точка привеса кварцевой нити в поршневом приборе (рис. 52) немного подвигалась с помощью суппорта параллельно направлению светового пучка, а поршневой аппарат получал некоторый соответственный наклон с помощью установочных винтов осветительного прибора (рис. 54). Зная расстояние между этими винтами и величину их хода, можно было вычислить величину наклона. И для этого нового наклона производился ряд наблюдений при четырёх различных наполняющих прибор газам.

В табл. I сопоставлены полученные результаты; N означает порядковый номер ряда опытов, φ — угол наклона. Средние значения отклонений (в делениях скалы) приведены здесь с средними величинами уклонений от этих значений. Знак (+) означает движение газовой массы в направлении лучей, (—) — в обратном направлении.

Таблица I.

N	φ	Газ	I		II		III	
			спереди	сзади	спереди	сзади	спереди	сзади
1	0,0°	CO ₂ чист.	— 0,85±0,04	+ 0,95±0,07	+ 0,25±0,07			
13	0,2	» »	— 0,15 0,06	+ 0,35 0,03	+ 0,25 0,04			
5	0,4	» »	+ 0,65 0,05	— 0,55 0,05	+ 0,20 0,10			
9	0,7	» »	+ 2,45 0,05	— 2,25 0,05	+ 0,15 0,12			
2	0,0	0,5 CO ₂ + 0,5H ₂	+ 0,30 0,05	+ 0,20 0,10	+ 0,45 0,06			
14	0,2	» » »	+ 0,25 0,02	+ 0,30 0,08	+ 0,45 0,08			
6	0,4	» » »	+ 0,40 0,05	+ 0,10 0,05	+ 0,55 0,06			
10	0,7	» » »	+ 0,50 0,07	— 0,15 0,08	+ 0,55 0,05			
3	0,0	C ₂ H ₂ чист.	— 0,15 0,07	+ 1,30 0,03	+ 1,10 0,04			
15	0,02	» »	+ 0,45 0,03	+ 0,70 0,06	+ 1,10 0,08			
7	0,04	» »	+ 1,00 0,10	— 0,20 0,06	+ 0,90 0,11			
11	0,07	» »	+ 2,60 0,16	— 1,50 0,11	+ 1,05 0,06			
4	0,0	0,5 C ₂ H ₂ + 0,5H ₂	+ 0,45 0,06	+ 0,35 0,07	+ 0,75 0,04			
16	0,2	» »	+ 0,45 0,07	+ 0,40 0,06	+ 0,80 0,07			
8	0,4	» »	+ 0,55 0,07	+ 0,30 0,08	+ 0,75 0,04			
12	0,7	» »	+ 0,70 0,07	+ 0,10 0,07	+ 0,75 0,10			

Результаты таблицы I, относящиеся к чистым газам, представлены графически на рис. 60. Здесь за абсциссы

взяты величины наклонов, за ординаты — величины отклонений в делениях скалы. Из чертежа ясно, во-первых, что в чистых газах даже при очень сильных конвекционных токах разницы отклонений (III), которыми измеряется величина светового давления, остаются почти постоянными; во-вторых, что в смесях с водородом отклонения очень мало зависят от изменения наклона.

Посредством установочных винтов осветительный прибор был приведён в наклон $0,2^\circ$; в этом положении он был использован для всех дальнейших измерений.

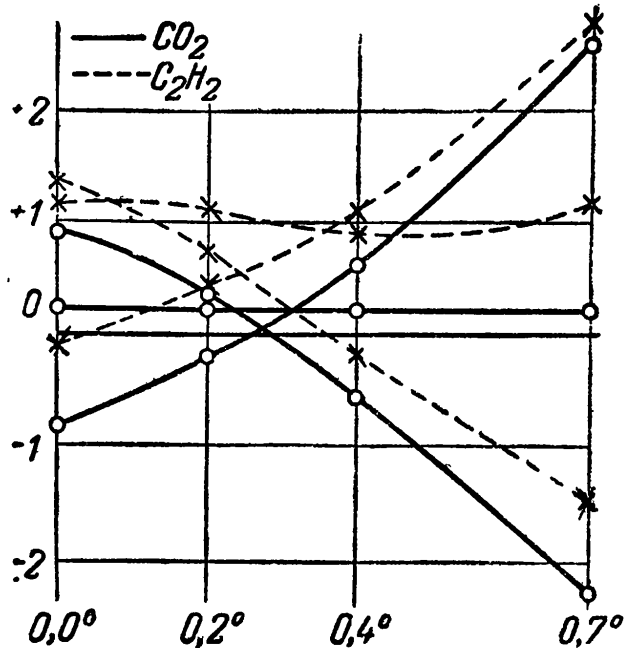


Рис. 60.

§ 16. Влияние наклона в направлении, перпендикулярном к пучку лучей (рис. 61), может сказываться в значительных систематических ошибках, так как появляющиеся при этом возмущающие силы меняют знак при изменении направления лучей на противоположное. Когда лучи падают на поглощающую массу газа, то сильнее всего нагреваются ближайшие по пути лучей слои; они действуют по отношению к последующим слоям как «светофильтры», и если газовое пространство наклонено так, как показано на рис. 61, то образуется течение более холодного газа к поршню R поршневого прибора, и от этого уменьшается измеряемое отклонение. То же самое имеет место относительно лучей, падающих на газовое пространство с противоположной стороны: возмущающая сила меняет точку приложения одновременно с изменением направления лучей и опять накладывается на силы давления. Если же газовое пространство имеет противоположный наклон, то оба отклонения увеличиваются.

Чтобы исследовать влияние этих неравномерных нагреваний на отклонения поршня, прибор наполнялся *воздухом*;

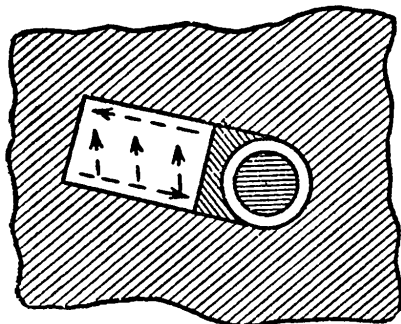


Рис. 61.

неравномерность нагревания достигалась тем, что в газовом пространстве помещалась алюминиевая решётка (рис. 62), зубцы которой были покрыты платиновой чернью. Лучи, падающие на решётку, нагревают эти зубцы, которые отдают полученную теплоту воздуху. Если решётка находилась поблизости от окошка и если газовое пространство было

наклонено в направлении, перпендикулярном к пучку (как на рис. 61), то при инсоляции всегда наблюдалось отклонение поршня, менявшее знак одновременно с изменением направления наклона; измеряя эти отклонения при различных величинах наклона, можно было найти такое положение, при котором инсоляция решётки не производила

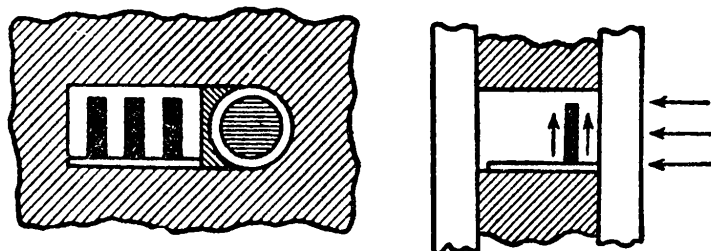


Рис. 62.

никакого отклонения поршня. Это положение при изменении формы решётки и её удаления от окошка оставалось почти постоянным (в пределах $\pm 0,5^\circ$). Таким образом можно было привести поршневый прибор в такое положение, при котором измеряемые силы светового давления зависели от наклона только в очень слабой степени.

Чтобы определить влияние такого наклона на величину измеряемых сил светового давления, прибор с помощью алюминиевой решётки устанавливался приблизительно правильно и наполнялся исследуемым газом; 11 наблюдений, следовавших друг за другом через 30 сек. при освещении

попеременно спереди и сзади, давали пять отдельных значений отклонения поршня; отсюда вычислялась средняя величина отклонения и среднее значение уклонов от этой средней величины. Полный ряд наблюдений охватывал измерения с чистой CO_2 , чистым C_2H_2 , со смесями $(0,5 \text{CO}_2 + 0,5 \text{H}_2)$ и $(0,5 \text{C}_2\text{H}_2 + 0,5 \text{H}_2)$.

Таблица II.

<i>N</i>	ϕ	CO_2 чист.	$0,5 \text{CO}_2 + 0,5 \text{H}_2$	C_2H_2 чист.	$0,5 \text{C}_2\text{H}_2 + 0,5 \text{H}_2$
I	$0,0^\circ$	$+2,85 \pm 0,14$	$+0,60 \pm 0,03$	$+2,35 \pm 0,10$	$+0,90 \pm 0,02$
II	$0,4$	$+0,95 \pm 0,05$	$+0,50 \pm 0,08$	$+1,40 \pm 0,06$	$+0,80 \pm 0,12$
III	$0,6$	$+0,25 \pm 0,04$	$+0,45 \pm 0,03$	$+1,10 \pm 0,03$	$+0,80 \pm 0,17$
IV	$1,3$	$-0,75 \pm 0,07$	$+0,40 \pm 0,08$	$+0,30 \pm 0,07$	$+0,65 \pm 0,08$
	α	0,0080	0,0055	0,0111	0,0080

После этого точка привеса кварцевой нити (рис. 52) с помощью суппорта немного сдвигалась в направлении, перпендикулярном к пучку лучей, осветительный прибор (рис. 54) соответственно наклонялся с помощью установочных винтов, и снова производился такой же ряд наблюдений. В таблице II собраны полученные результаты: *N* — порядковый номер ряда опытов, ϕ — угол наклона, α — коэффициент абсорбции (см. ниже табл. IV) газа, наполнявшего прибор. Знак (+) соответствует движению газа в направлении распространения лучей, знак (—) — движению в противоположную сторону.

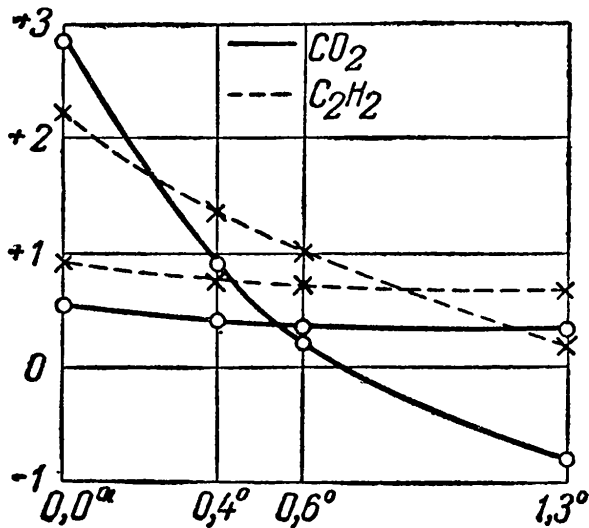


Рис. 63.

Результаты табл. II представлены графически на рис. 63. Из него ясно, что при измерениях сил светового давления

в водородных смесях небольшой наклон прибора в направлении, перпендикулярном к пучку лучей, влияет на результат сравнительно очень слабо; в этом случае установка с помощью алюминиевой решётки является совершенно достаточной. Совсем не так дело обстоит в случае чистых газов. *Поэтому в дальнейшем пришлось отказаться от измерения сил давления света в чистых газах.*

§ 17. Зато опыты с чистыми газами при различных наклонах прибора с полным удобством могут служить для того, чтобы облегчить установку прибора и избежать чрезвычайно долгих наблюдений с алюминиевыми решётками. Для этого надо воспользоваться предложением Фитцджеральда (доказываемым ниже), что силы давления прямо пропорциональны коэффициентам поглощения, и установить прибор так, чтобы его отклонения сделались приблизительно пропорциональными коэффициентам поглощения чистых газов. При такой установке и даже при значительном от неё отличающемся положении измерения сил светового давления в водородных смесях делаются совершенно свободными от систематических ошибок. Таким именно способом прибор был установлен и постоянно применялся при $\psi = 0,4^\circ$.

IV. Измерения.

§ 18. *Ряд наблюдений* состоял из определения коэффициента поглощения, ряда определений давлений, второго определения коэффициента поглощения и следующего за ним калориметрического измерения энергии падающих лучей.

§ 19. *Измерения абсорбции* начинались после того, как через поршневый прибор в продолжение десяти минут протягивался воздух из большого газометра. В течение этих же десяти минут готовилась для исследования газовая смесь. Для этой цели в газовую пипетку (рис. 58) вводилось 250 см^3 водорода из кипповского аппарата, а затем туда же нагонялся газ из соответствующего газометра, покуда общий объём не достигал 500 см^3 . Энергичным встряхиванием пипетки (причём вода в ней подбрасывалась на большую высоту) достигалось перемешивание введённых газов.

Так как сопротивление P (рис. 56) может изменяться только скачками по $\pm 0,1\Omega$, то наблюдались отклонения гальванометра при двух сопротивлениях P_1 и $P_1 \pm 0,1\Omega$, при которых эти отклонения были направлены в противоположные стороны; отсюда вычислялась величина компенсирующего сопротивления P_0 , введение которого влечёт за собой спокойствие гальванометра при освещении термоэлементов.

Такие определения проделывались при наполнении прибора сначала воздухом, а потом исследуемым газом; отсюда вычислялся коэффициент поглощения.

По окончании измерений давления снова определялась величина компенсирующего сопротивления при наполнении прибора сначала испытуемым газом, а потом воздухом, и снова вычислялась величина коэффициента поглощения.

Такое двукратное определение коэффициента поглощения является совершенно необходимым, потому что термоэлементы T_1 и T_2 (рис. 56) лежат в различных местах светового пучка и значит освещаются лучами, вышедшими из различных мест нернстовского штифта; в связи с этим обстоятельством, при высокой чувствительности измерения, достаточно совершенно незначительной деформации поверхности штифта (такое изменение легко может произойти за время измерений, около 15 мин.), чтобы обусловить значительное изменение величины компенсирующего сопротивления и неправильность в определении коэффициента поглощения. При двукратном измерении мы имеем взаимный контроль результатов; опыт показывает, что расхождение их в общем отстает от средней величины не более, чем на 10%.

Чтобы избежать образования влажной плёнки на флуоритовых окошках F_1 и F_2 поршневого прибора, что мешало бы определению поглощения, воздух и газовые смеси перед введением в поршневой прибор пропускались пузырьками через водный раствор $ZnCl_2$, где и задерживался излишек водяных паров.

§ 20. Для измерения сил давления через каждые полминуты отсчитывалось положение поршня, затем тотчас же с помощью пневматического приспособления изменялось

направление лучей; через 30 сек. следовал новый отсчёт и новое изменение направления пучка и т. д. Чтобы иллюстрировать ход такого ряда, может служить таблица III, дающая протокол одного ряда наблюдений (№ 8 для $0,5 \text{ CO}_2 + 0,5 \text{ H}_2$).

Таблица III.

Отсчитано		Вычислено		Отсчитано		Вычислено	
Направление пучка		Отклонение в делениях скалы	Отступление	Направление пучка		Отклонение в делениях скалы	Отступление
спереди	сзади			спереди	сзади		
5,0				6,0			
5,0	5,5	0,50	0,05	6,0	6,6	0,60	0,05
5,2	5,6	0,50	0,05	6,1	6,6	0,55	0,00
5,4	5,9	0,60	0,05	6,1	6,7	0,60	0,05
5,4	6,0	0,60	0,05	6,2	6,8	0,65	0,10
5,6	6,1	0,60	0,05	6,5	7,0	0,65	0,10
5,8	6,2	0,50	0,05	6,6	7,0	0,45	0,10
5,9	6,3	0,45	0,10	6,6	7,2	0,55	0,00
	6,6	0,65	0,10	6,7			

Средняя величина отклонения

$$0,55 \pm 0,06.$$

Чтобы предохранить отсчёты положения поршня от случайных колебаний, поршневой прибор был закутан ватой и снабжён металлической защитой; от излучения печей и тела наблюдателя он был закрыт большими металлическими экранами; ход его нулевой точки всегда был меньше, чем $\pm 0,2$ деления скалы в минуту.

§ 21. Энергия пучка измерялась калориметром (рис. 57), который помещался сзади поршневого прибора и подвергался предварительному охлаждению с помощью нескольких капель этилового эфира; подъём его температуры, а также и изменение температуры медной защиты наблюдались приблизительно в течение 10 минут через каждые 30 сек. Отсчёты наносились на координатную бумагу, связывались непрерывными кривыми; в точке пересечения двух кривых

строилась касательная к кривой калориметра (рис. 64). Отсюда высчитывался подъём температуры калориметра за 5 минут (от $0,40^{\circ}\text{C}$ до $0,65^{\circ}\text{C}$); вычисленная величина

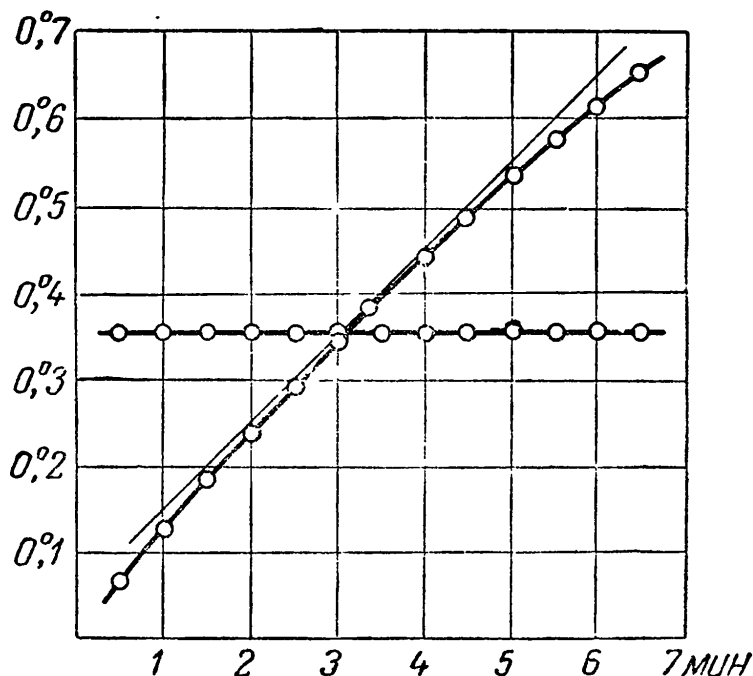


Рис. 64.

поправлялась на повышение температуры медной защиты (около $0,05^{\circ}$), так что

$$T_0 = T_1 - t.$$

Повышение T_0 можно было определить с точностью до $\pm 0,02^{\circ}\text{C}$, т. е. до $\pm 5\%$.

Достаточным оказывалось *одно* определение в конце ряда наблюдений, так как отдача энергии нернстовским штифтом в течение ряда колебалась только в пределах $\pm 2\%$.

V. Вычисление абсолютных величин.

§ 22. Абсолютная величина измеренных сил давления вычислялась из направляющей силы кварцевой нити и размеров поршневого прибора.

Направляющая сила определялась так же, как в моих прежних опытах (см. выше, стр. 171); для этой цели крючок

на конце нити нагружался медным цилиндром длиной в 1,20 см и весом в 0,020 г, а затем определялось время качания как при этой нагрузке ($\frac{T}{2} = 4,3$ сек.), так и одного крючка без нагрузки ($\frac{T}{2} = 1,9$ сек.). Направляющая сила нити D оказалась

$$D = 0,0016 \text{ дин} \cdot \text{см.}$$

Расстояние h центра поршня от оси кручения, измерявшееся по методу, данному мной ранее (см. выше, стр. 170), было равно 0,80 см. Сила, которая должна быть приложена к поршню, чтобы произвести отклонение в одно деление скалы, при расстоянии скалы в 5300 делений, равняется $1,9 \cdot 10^{-7}$ дины.

Поршень имел диаметр в 0,285 см, а отверстие, в котором он ходил, — 0,325 см. Если с одной стороны поршня устанавливается избыток давления, то к давлению, действующему на переднюю поверхность, нужно ещё прибавить те силы, которые возникают благодаря токам газа, образующимся в просвете между поршнем и стенками отверстия и имеющим стремление увлечь за собой и поршень. Простые соображения приводят к заключению, что общая сила, действующая на поршень, такова, как если бы диаметр поршня увеличился на половину просвета. Отсюда вычисляется величина *давления*, соответствующего отклонению на одно деление скалы, а именно

$$2,6 \cdot 10^{-6} \text{ дин/см}^2.$$

При этих измерениях необходимо ещё принять во внимание, что избыток давления в газе несколько больше, чем обнаруженное давление на поршень, так как газ непрерывно проникает через просвет, должен вновь подтекать через газовое пространство к поршню, и при этом благодаря трению в обоих каналах давление его несколько падает. Чтобы определить обусловленную этим обстоятельством поправку, были произведены опыты с трением *на моделях*: вода, капая из пипетки P (рис. 65), протягивала воздух между цилиндром и стенками, и соответственное

изменение давления отсчитывалось на уровне Теплера¹⁾. Эти опыты были проделаны также с прибором, изображённым на рис. 66; это — модель канала между газовым простран-

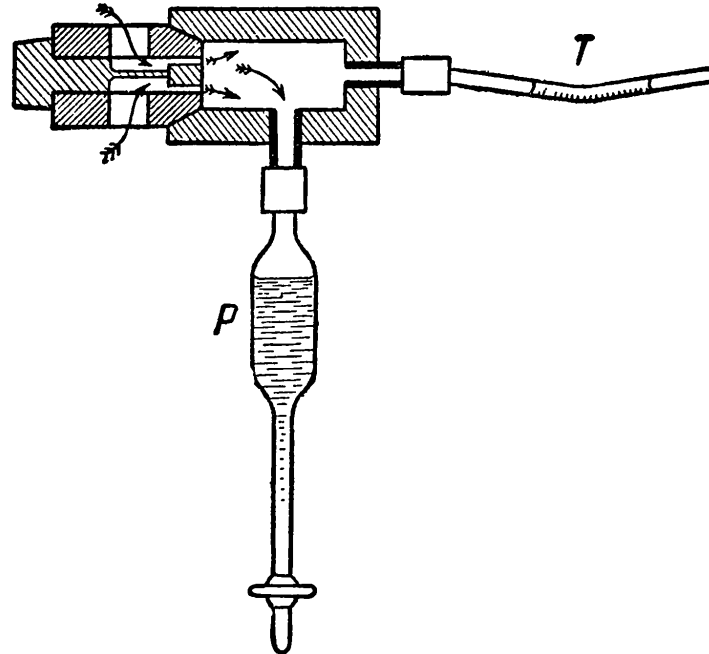


Рис. 65.

ством и поршнем. В двух рядах опытов произведение разности давлений и времени, в течение которого просасывался определённый объём воздуха, оставалось постоянным; отношение этих произведений для обоих приборов было очень близко к 25:1, откуда следует, что потеря давления в каждом канале составляет около 0,04; поэтому давление, соответствующее отклонению на одно деление скалы, составляет

$$2,8 \cdot 10^{-6} \text{ дин/см}^2.$$

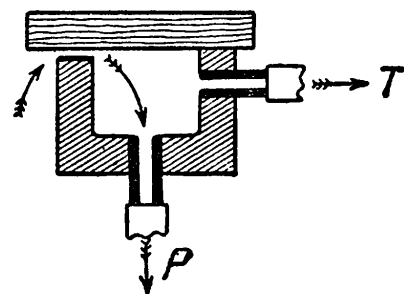


Рис. 66.

В окончательных измерениях постоянно наблюдалось двойное отклонение P , которое соответствует разности давлений при изменении направления светового пучка. Дав-

¹⁾ А. Тоерлер, Wied. Ann. 56, 611 (1895).

ление P_m , которое соответствует одному определённом направлению пучка, составит поэтому:

$$P_m = 1,4 \cdot 10^{-6} \text{ дин/см}^2.$$

Если принять в расчёт ошибки отдельных измерений, которые положены в основу при определении этой постоянной, то можно принять, что она определена правильно в пределах $\pm 5\%$.

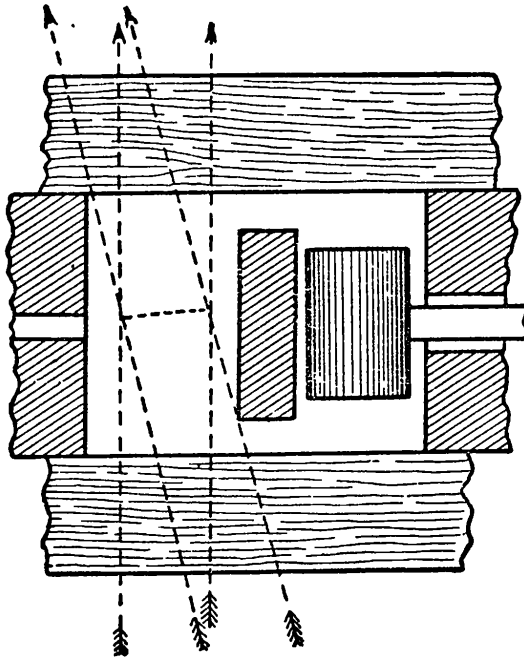


Рис. 67.

Если принять в расчёт ошибки отдельных измерений, которые положены в основу при определении этой постоянной, то можно принять, что она определена правильно в пределах $\pm 5\%$.

§ 23. Вычисление абсолютных величин давления по Фитцджеральду из величин энергии пучка и коэффициента поглощения встречает значительные затруднения, зависящие от геометрических условий; чтобы вычислить эти величины хотя бы только в первом приближении, но с достаточной степенью наглядности, приходится делать некоторые упрощающие предположения.

а) Простой приближённый расчёт показывает, что мы увеличим вычисленную величину всего на 3% , если мы оставим без внимания то обстоятельство, что исследуемый пучок лучей является сходящимся, и проведём подсчёт так, как если бы лучи были параллельны.

б) Самая значительная ошибка в вычислении сопряжена с тем, что разные места газа (рис. 67) освещаются различно, и внутри газа образуются токи, отчасти сглаживающие величину максимальных давлений. При существующих здесь необычайно сложных условиях едва ли возможно вычислить результирующие силы, давящие на поршень, и приходится опять-таки, чтобы вычислить силу давления в первом приближении, принимать, что на всю площадь газа ($0,30 \text{ см} \times 0,41 \text{ см} = 0,123 \text{ см}^2$) действует параллельный пучок лучей одинаковой всюду яркости, и допускать,

что вычисленная в таких упрощающих условиях сила действительно, в среднем, измеряется поршнем. Чтобы составить себе представление о том, насколько допустим указанный упрощенный подсчет, я пробовал точнее выяснить размеры возможных здесь максимальных и минимальных сил.

Не приводя здесь подробностей этих длинных вычислений, я укажу, что окончательный результат упрощенного подсчета не может отличаться от истины более чем на 30%.

в) Измеренная калориметром световая энергия пучка несколько менее энергии, действительно падающей на газовое пространство, так как заметная часть последней отражается задним флуоритовым окошком. Если принять среднюю величину показателя преломления флуорита в 1,42, то отношение падающей энергии к измеренной будет 1,06:1. Если известны повышение температуры T_0 за 5 минут (300 сек.) и водяной эквивалент калориметра ($W = 6,36$ г), то количество энергии E_0 , падающей в 1 сек. на 1 см^2 газа,

$$E_0 = \frac{1,06 \cdot 6,36 \cdot 4,18 \cdot 10^7}{300 \cdot 0,123} T_0 \frac{\text{эрг}}{\text{сек} \cdot \text{см}^2} = 7,6 \cdot 10^6 T_0 \frac{\text{эрг}}{\text{сек} \cdot \text{см}^2}.$$

г) Отраженные у заднего окошка лучи (около 6%) давят на газ с силой, направленной в обратную сторону в сравнении с измеряемой; но так как отраженные лучи заполняют лишь незначительную часть всей площади, занимаемой газом, то это обратное давление мало, и им можно пренебречь.

д) Из измеренного коэффициента абсорбции и измеренного повышения температуры T_0 калориметра *вычисляется* по Фитцджеральду, с указанными упрощениями а, б и г, абсолютная величина P_b силы давления на единицу площади (скорость света принята равной $3 \cdot 10^{10} \text{ см/сек}$)

$$P_b = \frac{\alpha E_0}{V} = \frac{7,6 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^{10}} \alpha T_0 = 2,5 \cdot 10^{-4} \alpha T_0 \text{ дин/см}^2$$

с систематическими отклонениями, которые не превышают $\pm 30\%$.

VI. Результаты.

§ 24. В таблице IV приведены результаты окончательных измерений: N обозначает номер серии наблюдений в хронологическом порядке, β — измеренное отклонение крутильных весов поршневого аппарата, выраженное в делениях скалы, α — измеренный коэффициент поглощения газа, T_0 — измеренное повышение температуры калориметра в течение пяти минут, из которого вычислялась величина энергии светового пучка E , проходящей через исследуемую газовую смесь в 1 секунду.

P_m обозначает абсолютную величину давления света на газ, измеренную поршневым прибором и выраженную в миллионных долях дины на квадратный сантиметр; она вычислена из отклонения β , направляющей силы кварцевой нити, размеров поршневого аппарата и расстояния скалы от прибора.

P_c обозначает величину давления света на газы, вычисленную согласно соотношению, указанному Фитцджеральдом, из величин α и E и выраженную также в миллионных долях дины на квадратный сантиметр.

Согласно предположению отношение $P_m:P_c$ должно быть постоянным и не отличаться существенно от единицы.

В таблице приведены 20 серий наблюдений, произведённых с четырьмя разными стержнями Нернста, как источниками света: этим объясняются колебания в яркости света (измеряемой T_0) и в коэффициентах поглощения α для одинаковых смесей газов.

Из таблицы следует, что для каждой газовой смеси отдельные серии наблюдений в среднем сходятся в пределах десяти процентов, соответственно неизбежным ошибкам трёх непосредственно измеряемых величин.

Для различных газовых смесей, коэффициенты абсорбции которых относятся друг к другу как 1:3 (метан и бутан), а плотности как 1:4 (бутан), отношения $P_m:P_c$ отличаются друг от друга на величины, большие, чем величины возможных ошибок наблюдений, и указывают на небольшие систематические ошибки, которые вызваны неизбежными неточностями в установке поршневого прибора.

Таблица IV.

N		β	α	T_0	P_m	P_c	$P_m:P_c$
3	0,5 метана	0,65±0,05	0,0065 ± 3	0,48	0,91	0,76	1,20
6	»	0,60±0,05	0,0057 ± 0	0,46	0,84	0,66	1,27
20	»	0,60±0,05	0,0071 ± 1	0,55	0,98	0,98	1,00
1	0,5 пропана	2,05±0,09	0,0200±25	0,42	2,86	2,10	1,36
2	»	1,75±0,08	0,0175± 0	0,43	2,45	1,89	1,30
11	0,5 бутана	2,10±0,07	0,0179±20	0,48	2,95	2,15	1,37
12	»	2,00±0,05	0,0172±10	0,48	2,80	2,06	1,35
13	»	3,10±0,05	0,0189±19	0,64	4,34	3,03	1,42
15	0,1 бутана	0,55±0,08	0,0063 ± 4	0,55	0,77	0,87	0,88
17	»	0,70±0,05	0,0072 ± 3	0,54	0,98	0,97	0,01
19	»	0,65±0,05	0,0067 ± 1	0,55	0,91	0,93	0,98
4	0,5 этилена	0,60±0,05	0,0068 ± 1	0,43	0,84	0,73	1,14
9	»	0,60±0,05	0,0075 ± 4	0,50	1,05	0,94	1,12
16	»	0,80±0,05	0,0075 ± 5	0,55	1,12	1,04	1,08
5	0,5 ацетилен	0,85±0,05	0,0080 ± 1	0,50	1,19	1,00	1,19
10	»	0,85±0,05	0,0080 ± 1	0,50	1,19	1,00	1,43
18	»	0,70±0,07	0,0063 ± 3	0,53	0,98	0,77	1,27
7	0,5 углекислоты	0,55±0,05	0,0055±10	0,50	0,77	0,69	1,11
8	»	0,55±0,06	0,0061± 0	0,48	0,77	0,73	1,05
14	»	0,70±0,05	0,0072± 3	0,51	0,98	0,92	1,06

§ 25. Полученные результаты мы можем формулировать следующим образом:

1) *Существование давления света на газы установлено опытным путём.*

2) *Величины этого давления прямо пропорциональны энергии пучка света и коэффициенту поглощения газа.*

3) *В пределах ошибок наблюдений и вычислений соотношение, указанное Фитцджеральдом, количественно удовлетворяет наблюдениям.*

Таким образом гипотеза о давлении света на газы, триста лет тому назад высказанная Кеплером, получила в настоящее время как теоретическое, так и экспериментальное обоснование.

Физический институт Университета,
Москва, февраль 1910.



ПРЕДЕЛЬНАЯ ВЕЛИЧИНА КОРОТКИХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН.

Попыткам получить очень короткие акустические волны положен предел поглощением этих волн благодаря внутреннему трению и теплопроводности тех газов, в которых они распространяются. Имеющиеся теоретические и опытные исследования позволяют легко определить эту границу.

Так, Стокс¹⁾ уже в 1845 году показал, что при распространении звуковой волны в воздухе она поглощается благодаря внутреннему трению в газе: бегущая плоская волна, амплитуда которой U_0 , после пробега пути x имеет меньшую амплитуду:

$$U = U_0 e^{-mx}. \quad (1)$$

По Стоксу

$$m = \frac{8\pi^2 \mu}{3\lambda^2 \rho a}, \quad (2)$$

где

μ — коэффициент внутреннего трения газа;

λ — длина звуковой волны;

a — скорость звука;

ρ — плотность газа.

Кирхгоф²⁾ в 1868 году указал, что при своём распространении звуковая волна слабеет и от обмена тепла, обус-

¹⁾ G. Stokes, Math. and Phys. Papers 1, p. 100. Cambridge, 1880.

²⁾ G. Kirchhoff, Pogg. Ann. 134, 177 (1868); Ges. Abh. p. 540, Leipzig, 1882. См. также В. Brunhes, Journ. d. Phys. (3) 6, 289 (1897).

ловленного теплопроводностью газа, — потеря, которая налагается на потерю, указанную Стоксом. По Кирхгофу

$$U = U_0 e^{-(m+w)x}, \quad (3)$$

$$m = \frac{2\pi^2}{\lambda^2 \rho \alpha} \cdot \frac{K}{C_p} \left(\frac{C_p}{C_v} - 1 \right), \quad (4)$$

где

K — коэффициент теплопроводности газа;

C_p — удельная теплота для $p = \text{const}$;

C_v — удельная теплота для $v = \text{const}$.

К внутреннему трению и теплопроводности прибавляется ещё потеря, обусловленная тепловым излучением, но эта потеря, как указал лорд Рэлей¹⁾, очень незначительна.

Упомянутые работы изложены в их взаимной связи в сочинениях лорда Рэля²⁾, Ламба³⁾ и Ауербаха⁴⁾.

Недавно Джинс⁵⁾ указал ещё на одну поправку, которую необходимо принимать во внимание при вычислении затухания бегущей волны, — поправку, вытекающую из особых представлений о структуре и форме молекул; эту поправку Джинса можно ввести, соответственно увеличивая коэффициент μ внутреннего трения:

$$\mu' = (1 + 0,146) \mu. \quad (5)$$

Из уравнения (3) следует, что сила звука I после того, как плоская волна пробежала путь x , выражается так:

$$I = I_0 e^{-2(m+w)x} = I_0 e^{-A \frac{x}{\lambda^2}}, \quad (6)$$

$$A = \frac{4\pi^2}{\alpha \rho} \left[\frac{4}{3} \mu + \left(\frac{C_p}{C_v} - 1 \right) \frac{K}{C_p} \right]. \quad (7)$$

¹⁾ Lord Rayleigh, *Scient. Papers* 4, 376. Cambridge, 1903.

²⁾ Lord Rayleigh, *Theory of Sound*, 2, p. 100. Cambridge, 1896.

³⁾ H. Lamb, *The dynamical theory of Sound*, p. 183. London, 1910.

⁴⁾ F. Auerbach, *Winkelmann's Handb. d. Phys.* 2, p. 553. Leipzig, 1909.

⁵⁾ J. Jeans, *The dynamical theory of Gases*, p. 302. Cambridge, 1904.

В том случае, когда звуковая волна распространяется в *воздухе* при 18° и 753 мм давления, мы можем воспользоваться следующими числовыми величинами постоянных:

$$\begin{aligned} \mu &= 0,000185 [C^{-1}. G. S^{-1}.]; \\ \rho &= 0,00120 [C^{-3}. G.); \\ a &= 3440 [C. S^{-1}.]; \\ C_p &= 0,237 [г. кал. G^{-1}.]; \\ \frac{C_p}{C_v} &= 1,40; \\ K &= 0,000053 [г. кал. C^{-1}. S^{-1}]. \end{aligned}$$

Постоянные μ , ρ , a , C_p и C_v взяты мной из таблиц Ландольта и Бернштейна, а постоянная K заимствована из работы Тодда¹⁾.

Постоянная A (уравнение 7) по Кирхгофу имеет числовое значение

$$A = 0,00032. \quad (8)$$

С поправкой Джинса (уравнение 5):

$$A' = 0,00037. \quad (9)$$

Непосредственные измерения Неклепаева²⁾ дают:

$$A_0 = 0,00073 \pm 0,00005. \quad (10)$$

Отсюда следует, что постоянная A , найденная Неклепаевым как результат непосредственных измерений, в порядке величины соответствует ожидаемой теоретически, но численно около двух раз больше теоретической. Такая разница лежит вне возможных ошибок измерений; но вопрос остаётся открытым, насколько мы вправе пользоваться, по Стоксу и Кирхгофу, теми коэффициентами, которые были измерены при установившихся процессах трения и теплопроводности, и прилагать их к процессам, которые перемещаются в пространстве со скоростями звука, т. е. со скоростями, близкими к скоростям молекул газа, и которые периодически меняются на расстоянии длины волны,

1) G. W. Todd, Proc. Roy. Soc. **83**, 36 (1909).

2) Н. Неклепаев, Ж. Р. Ф. Х. О. (ч. физ.) **43** (1), стр. 101, 1911; Ann. d. Phys. **35**, 175 (1911).


а эта длина не бесконечно велика по сравнению с длиной среднего свободного пути молекул.

В общих чертах опыт и теория согласно свидетельствуют, что звуки средней высоты сколько-нибудь заметно не поглощаются воздухом. Для коротких акустических волн это поглощение становится уже заметным; полагая, что постоянная $A=0,00073$ не увеличивается для коротких волн, легко вычислить тот путь l , пробегая который звуковая волна ослабляется до одной сотой доли своей первоначальной силы; эти пути суть:

для $\lambda_1=0,8$ мм	$l_1=40$ см,
» $\lambda_2=0,4$ »	$l_2=10$ »
» $\lambda_3=0,2$ »	$l_3=2,5$ »
» $\lambda_4=0,1$ »	$l_4=0,6$ » .

Тут мы подходим к *предельным величинам* коротких акустических волн.





МАГНИТОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВРАЩАЮЩИХСЯ ТЕЛ. ПЕРВОЕ СООБЩЕНИЕ.

§ 1. Открытие Гэля¹⁾, что вихревое движение фотосферы вокруг солнечных пятен порождает сильные магнитные поля (вызывающие в линиях Фраунгофера явление Земана), указывает на замечательное соотношение магнитных явлений на поверхности *Солнца* и магнитных свойств *Земного шара*: знак нормальной магнитной поляризации *Земли* находится в таком же отношении к направлению её вращения, как и знак магнитной полярности солнечных пятен к направлению вихревого движения фотосферы вокруг пятна, и этот знак соответствует движению свободных отрицательных электрических зарядов вместе с вращающимся веществом.

Сходство этих двух явлений, которое по недостатку необходимых данных мы, к сожалению, не можем проследить более подробно, — это сходство заставляет предполагать, что и физические причины, обуславливающие появление магнитных полей, и в том и в другом случае одинаковы. Свести эти магнитные силы к уже известным электромагнитным явлениям можно только прибегая к добавочным, экспериментально не обоснованным гипотезам, а поэтому я в последующем задался целью воспроизвести в лаборатории это космическое явление и непосредственно

¹⁾ G. E. Hale, *Astrophys. Journ.* 28, 317 (1908).

магнитометрически исследовать магнитные явления, вызываемые вращением тел.

§ 2. При производстве указанных опытов приходится считаться с очень большой трудностью, которая обусловлена тем, что по сравнению с космическими условиями мы при лабораторных опытах можем пользоваться только ничтожно малыми массами, малыми линейными скоростями и лишь низкими температурами, поэтому и вопрос остаётся открытым, будут ли при этих условиях магнитные силы, вызываемые вращением тел, достаточно велики, чтобы существование их можно было обнаружить магнитометрически.

Чтобы получить представление о порядке величины тех магнитных сил, которые можно ожидать при лабораторных опытах, приходится делать определённые гипотезы относительно возникновения магнитного поля при вращении тела и, исходя из абсолютных величин, относящихся к *Земному шару*, определять величину тех магнитных сил, которые можно ожидать при заданных условиях опыта: исследование сводится, таким образом, к проверке тех гипотез, которые были сделаны для объяснения явлений нормального геомагнетизма и которые при лабораторных условиях позволяют рассчитывать на появление заметных магнитных сил.

§ 3. Опыты, описанные ниже, предназначались для проверки гипотезы Сузерлэнда¹⁾, которая объясняет магнитное действие вращающейся материи тем, что в каждом нейтральном атоме центры тяжестей его разноимённых зарядов не совпадают и так сдвинуты друг относительно друга, что центры отрицательных зарядов описывают *большие пути*, чем центры положительных; таким образом возникающее магнитное поле является результатом *разности* конвекционных действий отрицательных и положительных зарядов вращающейся материи.

Как на физическую причину, обуславливающую взаимное смещение зарядов в атомах, Сузерлэнд указывает на *гравитационные* силы, и, не входя в рассмотрение механизма явления, он сделал гипотезу, что атомы гравитирую-

¹⁾ W. Sutherland, *Terr. Magn. and Atm. Electr.* 8, 49 (1903); 9, 167 (1904).

щей массы представляют собой электрические диполи, моменты которых совпадают с направлением силы тяжести.

В отличие от этой гипотезы Сузерлэнда с одинаковым успехом можно принять другое предположение, а именно: что взаимное сдвигение зарядов в атомах происходит не под влиянием гравитационных сил, а под влиянием *центробежных ускорений*, возникающих во вращающейся массе, и сделать гипотезу, что отрицательные заряды атома смещаются в направлении, перпендикулярном к оси вращения.

Каждая из приведённых гипотез приводит, как показывают изложенные ниже рассуждения, к заключению, что, пользуясь массами и скоростями, с которыми ещё удобно оперировать в лаборатории, мы должны ожидать в наших опытах возбуждения легко измеряемых магнитных сил, если предположим, что исследуемые тела (латунь, эбонит, вода) возбуждают при вращении магнитные силы приблизительно в той степени, в которой их вызывает и вещество *Земного шара*; так как обе гипотезы касаются только свойств отдельных атомов и не связаны с вопросом о температуре вращающегося тела, то и проверочные лабораторные опыты можно производить при комнатной температуре.

Чтобы убедиться, достаточно ли чувствительность магнитометра для обнаружения ожидаемых магнитных сил вращающихся тел, равные по величине магнитные поля возбуждались гальваническими токами определённой силы, протекавшими по проволокам особым образом намотанных катушек, которые представляли собой в магнитном отношении модели вращающихся тел; во всех случаях чувствительность магнитометра была достаточна.

I. Приборы.

§ 4. Схема расположения опытов изображена на рис. 68; при помощи фрикционного диска F , который насажен на томпаковую ось Q и приводится во вращение электродвигателем, быстрое вращательное движение (30 000—35 000 об/мин) сообщается при помощи колёсика K вертикальной гибкой бронзовой оси AA , на средней части которой укреплена обойма, несущая кольцо RR из испытуемого веще-

ства; на верхней части оси нарезан винт, захватывающий зубчатое колесо счётчика оборотов¹⁾).

Опыты производились таким образом, что первоначально исследовалось действие ненагруженной оси AA на магнитометр M , а потом действие её при вращении вместе с

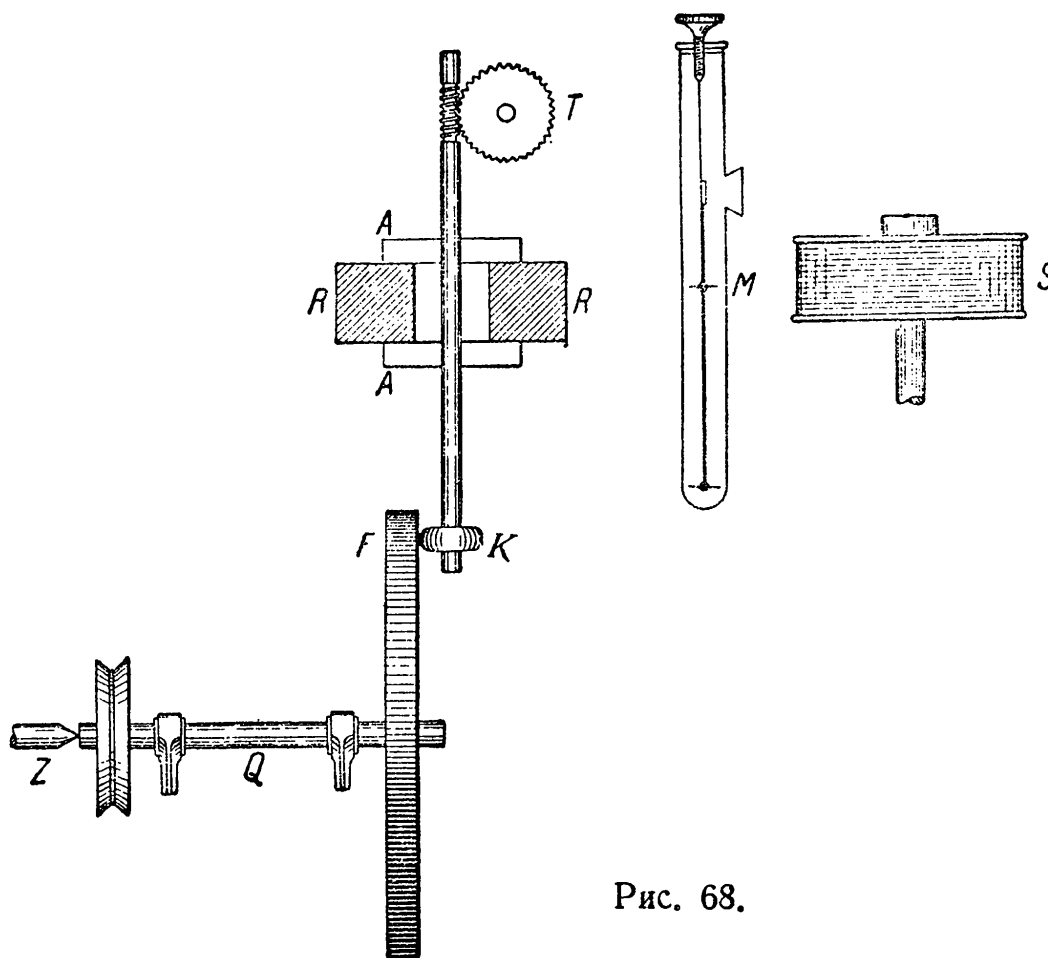


Рис. 68.

кольцом RR ; *разность* этих двух действий должна соответствовать действию кольца.

¹⁾ Не входя здесь в детальное описание прибора, замечу только, что весь прибор был построен из бронзы; из стали были сделаны только короткие тонкостенные вкладыши для шеек осей; смазочное масло подводилось к ним под давлением в достаточном количестве. Шейки вертикальной оси, несмотря на тщательную установку, снашивались довольно быстро — каждая ось выдерживала от 5 до 10 миллионов оборотов. Наиболее пригодным материалом для колёсика счётчика оказалась слоновая кость.

Чтобы испытывать чувствительность магнитометра M , симметрично ко вращающемуся кольцу помещалась проволочная модель S последнего, которая в зависимости от проверяемой гипотезы имела различные обмотки (§ 8 и § 12).

Размеры кольца RR были следующие: наружный диаметр $= 6$ см, внутренний диаметр $= 2$ см, высота $= 2$ см. Кольцо из изолятора (эбонита) было выточено из одного куска; кольца из проводников (латунь, алюминий) были составлены каждое из десяти тонких (в 2 мм) кружков, изолированных друг от друга прокладками из папиросной бумаги; жидкости (вода, бензол) наливались в пустотелый бронзовый сосуд, полость которого соответствовала вышеуказанным размерам кольца и была разделена восемью радиально расположенными стенками на отдельные камеры для того, чтобы при вращении сосуда избежать отстаивания жидкости.

Станина с вращающейся осью была укреплена на каменной колонне. Перпендикулярно к магнитному меридиану с двух сторон колонны были расположены две проволочные обмотки (диаметр $= 180$ см), которые служили для того, чтобы, пропуская через них электрические токи, компенсировать горизонтальную слагающую земного магнитного поля в том месте, где находилось вращающееся кольцо, и таким образом препятствовать возбуждению токов Фуко во вращающихся частях прибора. Две обмотки, расположенные параллельно магнитному меридиану (диаметр $= 170$ см), позволяли возбуждать пертурбирующее поле заданной силы.

Магнитометр, подвешенный к потолку лаборатории, имел астатическую стрелку (длина каждой стрелки 0,3 см, расстояние друг от друга 8 см), которая вместе с зеркальцем и кварцевой нитью была погружена в трубку, наполненную керосином: благодаря этому приёму стрелка устанавливалась аperiодически. От пертурбирующих магнитных влияний, обусловленных трамваем, астатическая стрелка была защищена по способу Дю-Буа и Рубенса¹⁾: на трубку

¹⁾ H. du Bois und H. Rubens, Electrotechn. Zeitschr. 15, 321 (1894).

магнитометра около стрелки с большим магнитным моментом было надвинуто маленькое колечко из тонкой железной проволоки, которое вокруг этой стрелки несколько ослабляло поле земли; задавая произвольно пертурбирующее поле при помощи электрического тока в проволочных обмотках, нетрудно было найти такое положение кольца, при котором аstaticкая стрелка не давала заметных отклонений, т. е. не зависела от внешнего поля. Направляющее поле задавалось двумя маленькими вертикальными магнитами, помещёнными вблизи стрелки с меньшим магнитным моментом.

II. Гипотеза Сузерлэнда.

§ 5. Если мы, основываясь на гипотезе Сузерлэнда (§ 2), сделаем предположение, что во всяком нейтральном

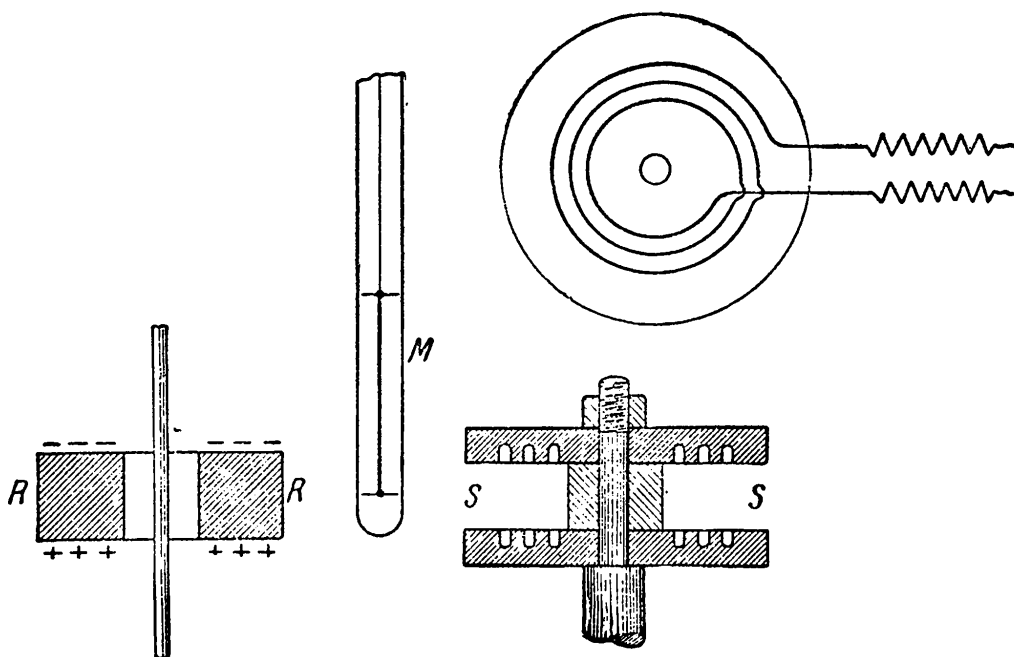


Рис. 69.

атоме его заряды под влиянием силы тяжести перемещены в направлении этой силы, то магнитное поле кольца RR (рис. 69), вращающегося вокруг вертикальной оси, должно соответствовать такому магнитному полю, которое получится при движении свободного отрицательного ($-$) заряда на верхней и свободного положительного ($+$) заряда на ниж-

ней поверхности вместе с вращающимся кольцом RR ¹⁾. Магнитное действие отдельных зон кольцевых поверхностей прямо пропорционально их линейным скоростям, и распределение магнитных силовых линий соответствует полю проволочной модели SS , на которой проводники распределены так, что средняя поверхностная сила тока каждого оборота прямо пропорциональна его радиусу и токи циркулируют в обеих плоских спиральях в противоположных направлениях. Сила магнитного поля наибольшая в экваториальных плоскостях вращающегося кольца RR и модели SS ; поэтому магнитометр M поставлен таким образом, что одна из его стрелок находится в этой плоскости.

§ 6. Силу тока, которую нужно поддерживать в модели SS (§ 5), чтобы получить магнитное поле, по силе соответствующее полю, ожидаемому при вращении кольца RR , нетрудно определить, если перейти к уменьшенной модели поля *Земного шара*.

Согласно гипотезе Сузерлэнда взаимное радиальное смещение ρ атомных зарядов прямо пропорционально напряжению силы тяжести, и для *Земного шара*

$$\rho = kr, \quad (1)$$

где r есть расстояние от центра земли, а k — постоянная, так как мы предполагаем, что вещество *Земного шара* однородно. Представим себе весь шар состоящим из ряда шаровых оболочек, толщина которых ρ ; обозначая через $\pm e$ те заряды в каждой единице объёма материи, которые смещаются под влиянием сил тяготения, мы получаем, что на всей поверхности шара равномерно распределяется отрицательный заряд $-E$:

$$-E = -e \cdot 4\pi R^2 \rho = -4\pi keR^3,$$

¹⁾ Согласно теории Сузерлэнда такой опыт соответствует в малом масштабе солнечному вихрю. На вопрос, может ли кольцо RR или какое-нибудь тело иной формы, находящееся под действием гравитационных сил, вызывать вокруг себя электрическое поле, гипотеза Сузерлэнда непосредственно без определённых добавочных предположений ответа не даёт; поэтому отсутствие заметного электростатического поля ещё не может служить опровержением гипотезы, и только прямой опыт с вращающимися телами разрешает вопрос.

соответствующий поверхностной плотности $-\epsilon$:

$$-\epsilon = -keR. \quad (2)$$

Для каждой шаровой оболочки внутри шара мы имеем наложение двух противоположных зарядов

$$+4\pi er_1^2\rho_1 - 4\pi er_2^2\rho_2 = +4\pi ek(r_1^3 - r_2^3),$$

что соответствует избытку объёмного положительного заряда, распределённого в шаровой оболочке, объём которой

$\frac{4}{3}\pi(r_1^3 - r_2^3)$; отсюда следует, что внутри шара положительный заряд имеет постоянную объёмную плотность σ ;

$$\sigma = +3ek \quad (3)$$

удовлетворяет условию, что сумма поверхностного отрицательного и объёмного положительного зарядов равна нулю.

В проволочной модели вращающегося шара удобно все обороты проволоки включить последовательно в одну цепь, чтобы оперировать с одной силой тока; отдельные обороты проволоки должны быть так распределены в шаровом объёме, чтобы «средние плотности» токов на поверхности и внутри шара были прямо пропорциональны расстояниям обмоток от оси вращения.

Рис. 70 представляет такую проволочную модель в разрезе: 13 кружков из эбонита, каждый приблизительно в

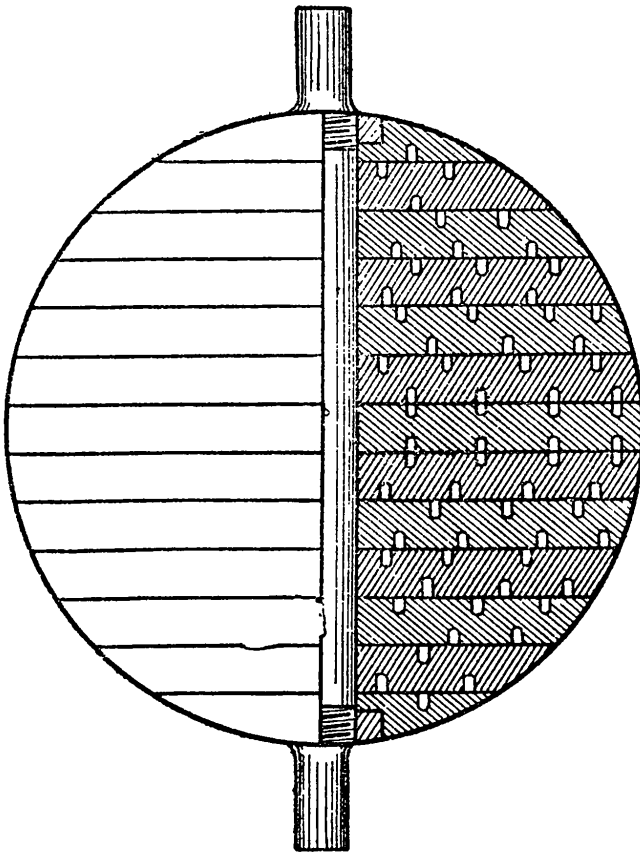


Рис. 70.

1 см толщиной, по оси удерживаются латунным болтом и обточены в виде шара диаметром в 12,7 см ($=10^{-9}$ *Земного шара*). На наружной поверхности каждого кружка вточено по 5 желобков, в которых помещается обмотка из тонкой (0,3 мм) медной проволоки; при таком распределении обмотки средние плотности токов на поверхности пропорциональны линейным скоростям зон.

Внутри шара обмотки распределены таким образом, что на каждый оборот проволоки, расстояние которого от оси шара равно b см, приходится площадь сечения, равная $(R^2:15 b)$ см². При таком распределении на среднюю пластинку приходится 8 оборотов, а на прилегающие к ней — по 8, 7, 6, 5, 3 оборотов проволоки и по 1 обороту на полярных пластинках; проволоки укреплены в желобках, вырезанных в пластинках. Все обороты проволок соединены последовательно так, что ток по поверхностной обмотке проходит в направлении, обратном току в проводниках, расположенных внутри шара; магнитное поле, вызываемое токами, соответствует, согласно гипотезе Сузерленда, магнитному полю вращающегося однородного шара.

§ 7. Чтобы определить абсолютные величины тех поверхностных и объёмных токов, которые мы имеем в случае вращающегося *Земного шара*, шаровая модель (§ 6) была помещена очень близко от коротенькой (в 0,3 см) магнитной стрелки тангенс-гальванометра таким образом, что стрелка находилась на экваториальной плоскости модели. Пропускаем через обмотку тангенс-гальванометра ток такой силы, чтобы вокруг стрелки образовалось поле в 0,34 гаусса, по силе равное полю *Земли* на экваторе; пропуская через обмотку шаровой модели ток в 0,28 ампера, можно было возвратить стрелку тангенс-гальванометра к нулю: при этой силе тока магнитное поле на экваторе модели численно равно полю *Земли* на экваторе. Если мы в 1 000 000 000 раз линейно увеличим размеры проволочной модели и сделаем её равной *Земному шару*, то, согласно «теореме подобия» лорда Кельвина, мы в равное число раз должны увеличить и силу тока в обмотках, чтобы в соответствующих точках пространства для двух моделей получить численно равные магнитные силы; отсюда следует,

что сила конвекционного тока на поверхности *Земного* экватора — около 1,4 ампера на 1 см широты.

§ 8. При опытах (§ 5) число оборотов кольца доходило до 30 000 об/мин, что соответствует периферической скорости вращения земного экватора (485 м/сек). Так как на периферии проволочной модели кольца (§ 5) один оборот проволоки приходился на зону в 0,2 см ширины, так же, как на экваторе шаровой модели (§ 6), то ток в модели, дающий поле, равное ожидаемому от вращения кольца, будет

$$i = 0,28 \cdot 0,2 = 0,056 \text{ А.}$$

Чувствительность магнитометра была такова, что этот ток вызывал отклонение в 120 делений шкалы.

Опыты, которые были сделаны с кольцами из *эбонита*, *латуни*, *алюминия*, *воды* и *бензола*, не дали заметных отклонений магнитометра ($> \pm 0,5$ делений шкалы).

III. Гипотеза центробежных сдвигов.

§ 9. Основываясь на гипотезе, что атомные заряды смещаются под действием центробежных сил (§ 3) и отрица-

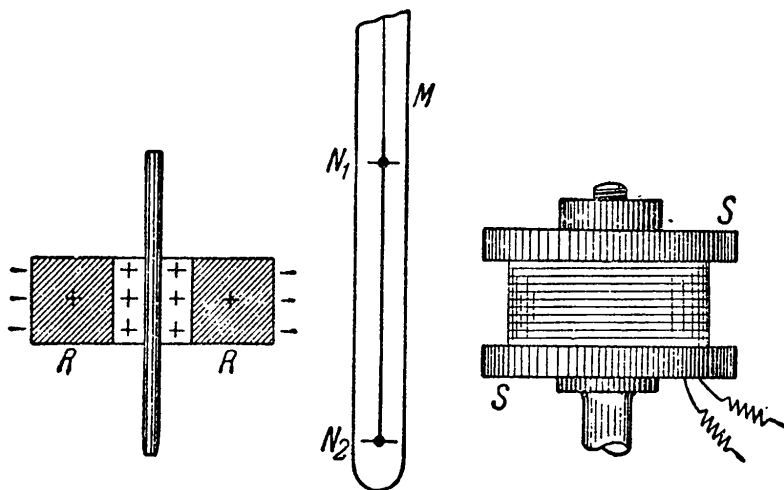


Рис. 71.

тельный заряд уходит дальше от оси вращения, мы должны ожидать, что магнитное поле вращающегося кольца *RR* (рис. 71) будет соответствовать движению свободного отрицательного (—) заряда на внешней цилиндрической по-

верхности и свободного положительного объёмного заряда тела вращающегося кольца.

Проволочная модель SS (рис. 71) должна слагаться из ряда коаксиальных соленоидов, а магнитометр M так помещён между вращающимся кольцом RR и его моделью SS , что горизонтальные слагающие их магнитных полей могут одновременно действовать на обе стрелки астатической системы.

§ 10. Чтобы выяснить те условия, которым должна удовлетворять обмотка модели, мы можем исходить из предположения, что взаимное сдвигение ρ атомных электриче-

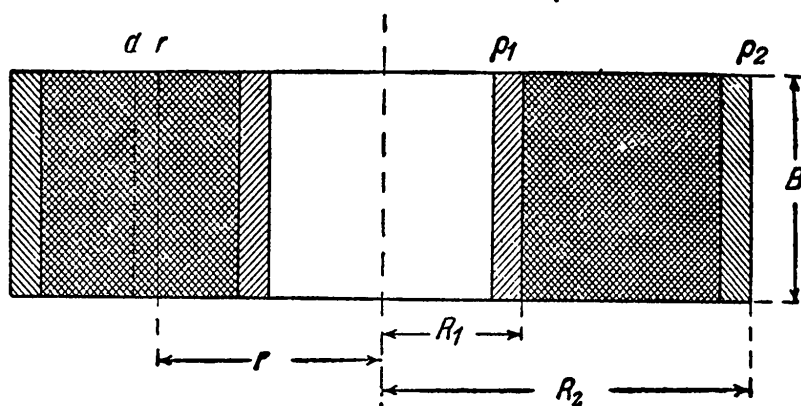


Рис. 72.

ских зарядов прямо пропорционально центростремительному ускорению a :

$$\rho = ca = c\omega^2 r, \quad (4)$$

где ω — угловая скорость, r — расстояние атома от оси вращения, c — постоянная величина; обозначая через $\pm e$ количества электричества в каждой единице объёма тела, перемещающиеся под действием центростремительных ускорений при вращении цилиндрического кольца, получается распределение зарядов, указанное на рис. 72, и магнитное действие этих зарядов,двигающихся с линейными скоростями v , можно представить как действие следующих зарядов:

а) отрицательного (—) заряда на внешней поверхности кольца, слой которого ρ_2 , линейная скорость движения v :

$$v_2 = \omega R_2,$$

а магнитное действие соответствует конвекционному току

$$I_{R_2} = -\rho_2 e v_2 = -C e \omega^3 R_2^2 B; \quad (5)$$

б) аналогичного действия положительного (+) заряда

$$I_{R_1} = + C\omega^3 R_1^2 B; \quad (6)$$

в) действия положительного объёмного заряда, которое легко определить, если иметь в виду, что отрицательный заряд распределяется на кольцо, которое в $(1 + c\omega^2)^2$ раз больше кольца, содержащего положительный заряд, что обуславливает во всём теле кольца избыток объёмного положительного заряда

$$\sigma = 2c\omega^2$$

и соответствует электрическому току δi_r в элементарном кольцевом цилиндре, толщина которого dr ,

$$\delta i = + 2c\omega^2 B r dr. \quad (7)$$

Обозначая через N_1 и N_2 число оборотов проволоки соленоидов, намотанных на внутреннюю и на внешнюю поверхность кольца, должно быть на каждый сантиметр высоты

$$N_2 = R_2^2 \quad (\text{из } 5),$$

$$N_1 = R_1^2 \quad (\text{из } 4).$$

Как легко видеть, внутри кольцевого сечения проволочная обмотка должна быть так расположена, чтобы на каждый квадратный сантиметр приходилось число витков n , пропорциональное расстоянию витков от оси вращения,

$$n = 2r.$$

Проволочная модель *SS* (рис. 71) была составлена из соленоидов, намотанных на девяти плотно входивших друг в друга коротких эбонитовых цилиндрах; два эбонитовых флянца и латунный болт скрепляли всю систему. Наружная обмотка состояла из 18 витков проволоки, внутренняя — из 2, а остальные 16 витков были распределены на 7 промежуточных соленоидов.

Условия моей работы сложились так неблагоприятно, что я не имел возможности построить шаровую модель согласно требованиям гипотезы центробежных смещений и удовольствовался тем, что по способу, указанному в § 7, определил ту силу тока в модели, которая необходима для

получения на экваторе её магнитного поля, равного по напряжению полю на экваторе *Земли* (0,34 гаусса); опыты показали, что сила этого тока $I = 0,2$ ампера. Для шаровидной модели сила тока должна быть несколько меньше, но во всяком случае не меньше 0,1 ампера.

§ 11. Для того чтобы перейти от условий образования поля вращающимся *Земным шаром* к условиям вращающегося кольца, можно воспользоваться такими соображениями: если вращаются два подобных кольца из одинакового вещества, соответствующие радиусы которых r_1 и r_2 , то силы магнитных полей, образуемых ими в соответствующих точках пространства, согласно теореме подобия лорда Кельвина, тогда равны, когда эквивалентные силы токов в них относятся как $r_1:r_2$. Из гипотезы, подлежащей проверке, следует, что для всякого вращающегося кольца эквивалентная сила электрического тока в нём прямо пропорциональна его сечению, величине действующего в нём центробежного ускорения и линейной скорости движения его частей, а следовательно, отношение эквивалентных токов для двух колец будет

$$\frac{\omega_1^3 r_1^4}{\omega_2^3 r_2^4} = \frac{v_1^3 r_1}{v_2^3 r_2},$$

где v — линейные скорости соответствующих точек; оба вращающихся кольца дают в соответствующих точках пространства равные магнитные поля, если линейные скорости их соответствующих точек равны. Отсюда следует, что два вращающихся шара из одинакового вещества должны давать в соответствующих точках пространства магнитные поля, силы которых относятся как кубы их линейных скоростей на экваторах.

§ 12. При опытах § 9 при 30 000 оборотах в минуту скорость по периферии составляла около 0,2 линейной скорости вращения экватора *Земли* (см. § 8). Магнитное действие проволочной модели при токе в 0,1 ампера (см. § 10) соответствует экваториальной скорости по периферии вращающегося кольца; для скоростей, достигнутых при опытах, соответствующая сила тока в проволочной модели $0,1 \cdot (0,2)^3 =$ приблизительно 0,001 ампера; при пропускании

такого тока через обмотку модели магнитометр давал отклонение в 10 делений скалы.

Опыты, которые были сделаны с кольцами из *эбонита*, *латуни*, *воды* и *бензола*, не дали заметных отклонений магнитометра.

IV. Заключение.

§ 13. Как показали опыты, вышеприведённые гипотезы образования магнитных полей вокруг вращающихся тел оказались не выдерживающими прямой опытной проверки. Указанными двумя гипотезами далеко ещё не исчерпывается возможная связь движения материи с образованием магнитных полей, которую мы наблюдаем в случае солнечных пятен и явлений нормального геомагнетизма. Другие гипотезы, которые могут быть сделаны относительно этой связи и которые достаточны для объяснения магнитных сил очень больших двигающихся масс, заставляют ожидать, что при условиях и размерах описанных выше опытов могут возникнуть только очень слабые магнитные поля, которые не могут быть обнаружены магнитометрически; для проверки таких гипотез самую схему опытов надо изменить, чтобы получить достаточную чувствительность измерений, во много раз большую той, которой можно было пользоваться при описанных выше предварительных исследованиях.

Изложенные выше исследования были начаты в Физическом институте Московского университета и в настоящее время ведутся мной в Физической лаборатории Московского городского университета имени Шанявского.

В заключение я должен высказать мою благодарность механику А. И. Акулову, который, сперва в качестве механика Физического института, а потом механика Городского университета, помогал и помогает мне при этих трудных исследованиях.

Москва. Ноябрь 1911.



СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие редактора	5
Пётр Николаевич Лебедев. (Биографический очерк)	11
Об измерении диэлектрических постоянных паров и о теории диэлектриков Моссотти-Клаузиуса	35
Об отталкивательной силе лучейиспускающих тел	60
О двойном преломлении лучей электрической силы	66
Экспериментальное исследование пондеромоторного дей- ствия волн на резонаторы	84
Введение	84
Глава I. Электромагнитные резонаторы	90
Глава II. Гидродинамические резонаторы	112
Глава III. Акустические резонаторы	133
Опытное исследование светового давления	151
Физические причины, обуславливающие отступления от гра- витационного закона Ньютона	181
Термоэлементы в пустоте, как прибор для измерения лучи- стой энергии	189
Опытное исследование давления света на газы	195
Предельная величина коротких акустических волн	225
Магнитометрическое исследование вращающихся тел. Пер- вое сообщение	229

Редактор *В. А. Григорова.*
Техн. редактор *С. Н. Ахламов.*
Переплёт и графическая орнаментация книги
художника *В. А. Селенгинского.*

*

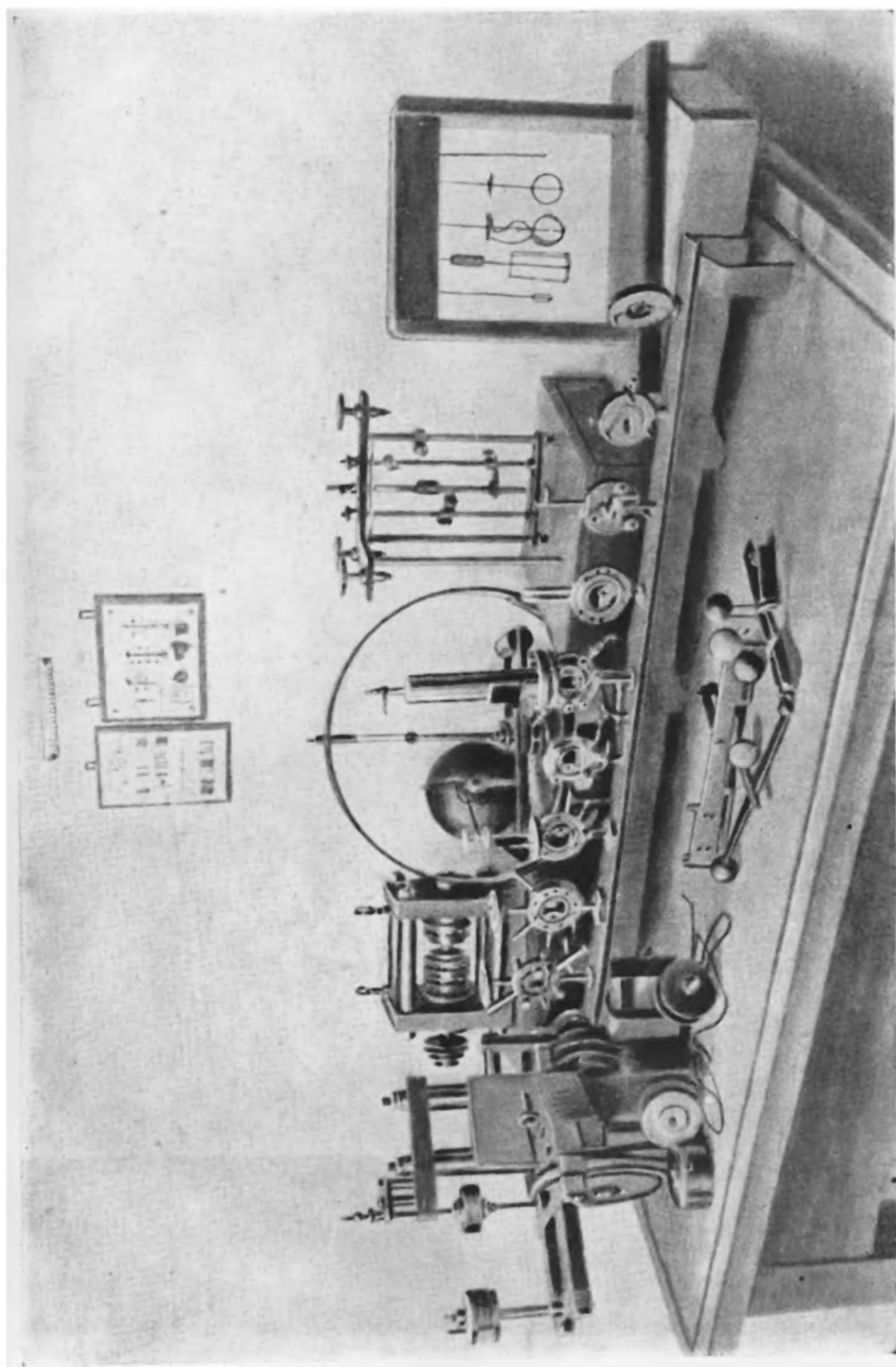
Подписано к печати 15/VIII 1949 г. Объём
печ. л. 15,25 + 4 вклейки. Уч.-издат. л. 13,02.
Тип. знак. в печ. л. 33 500. Цена книги 7 р. 80 к.
Переплёт 2 р. Тираж 8000. А09686. Заказ № 465.

*

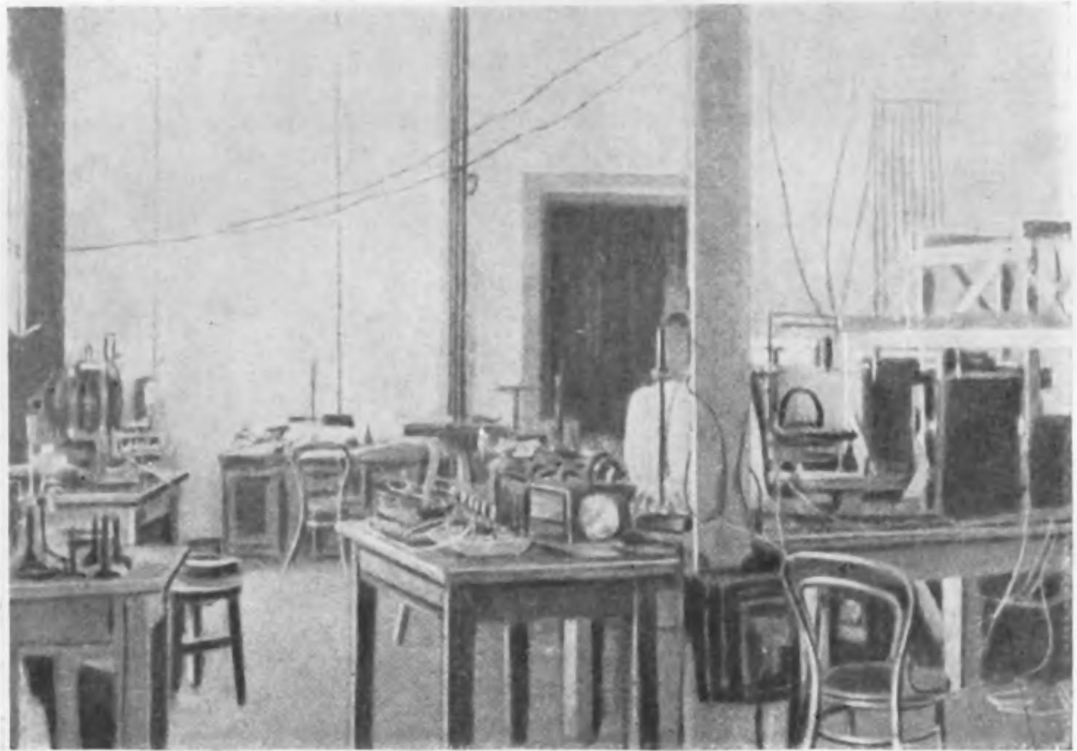
Первая Образцовая тип. имени А. А. Жданова
Главполиграфиздата при Совете Министров
СССР. Москва, Валуевая, 28.



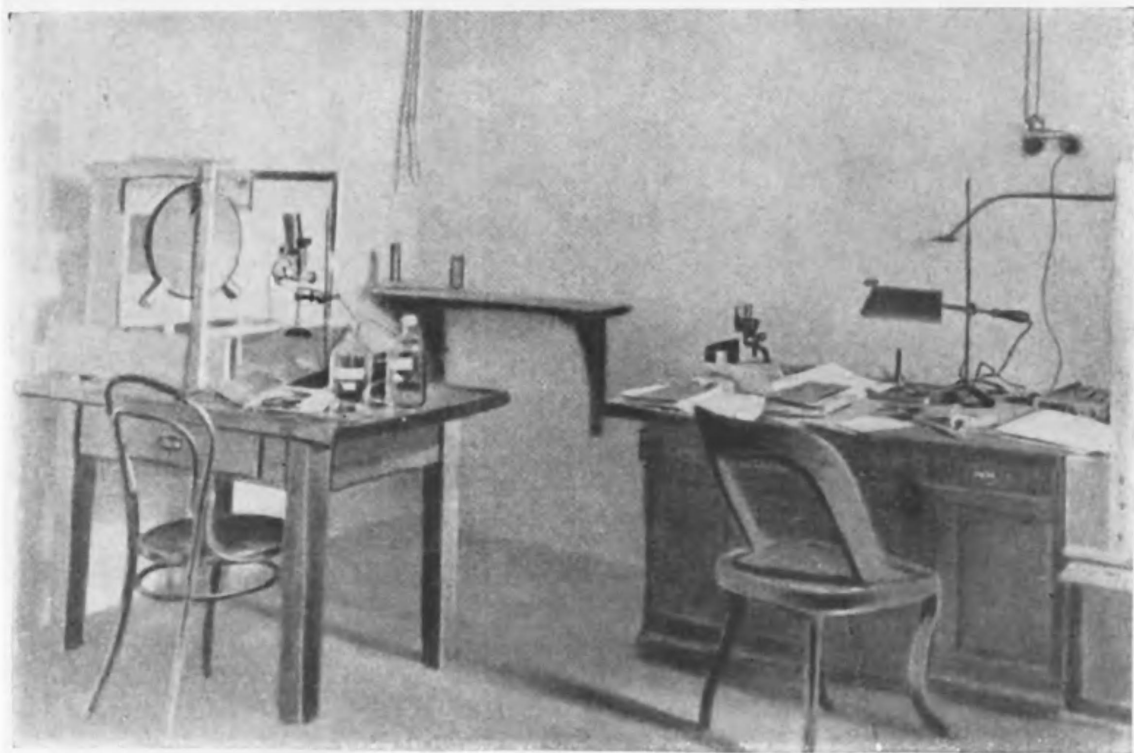
M. A. Degey



Приборы, служившие для различных исследований П. Н. Лебедева. Сверху, в небольших витринах — «Световое давление» и «Короткие электромагнитные волны». Справа, тоже в витрине — «Действие волн на резонаторы». Слева и сзади — «Магнитометрическое исследование вращающихся тел». В середине — целый ряд приборов для «Светового давления на газы».



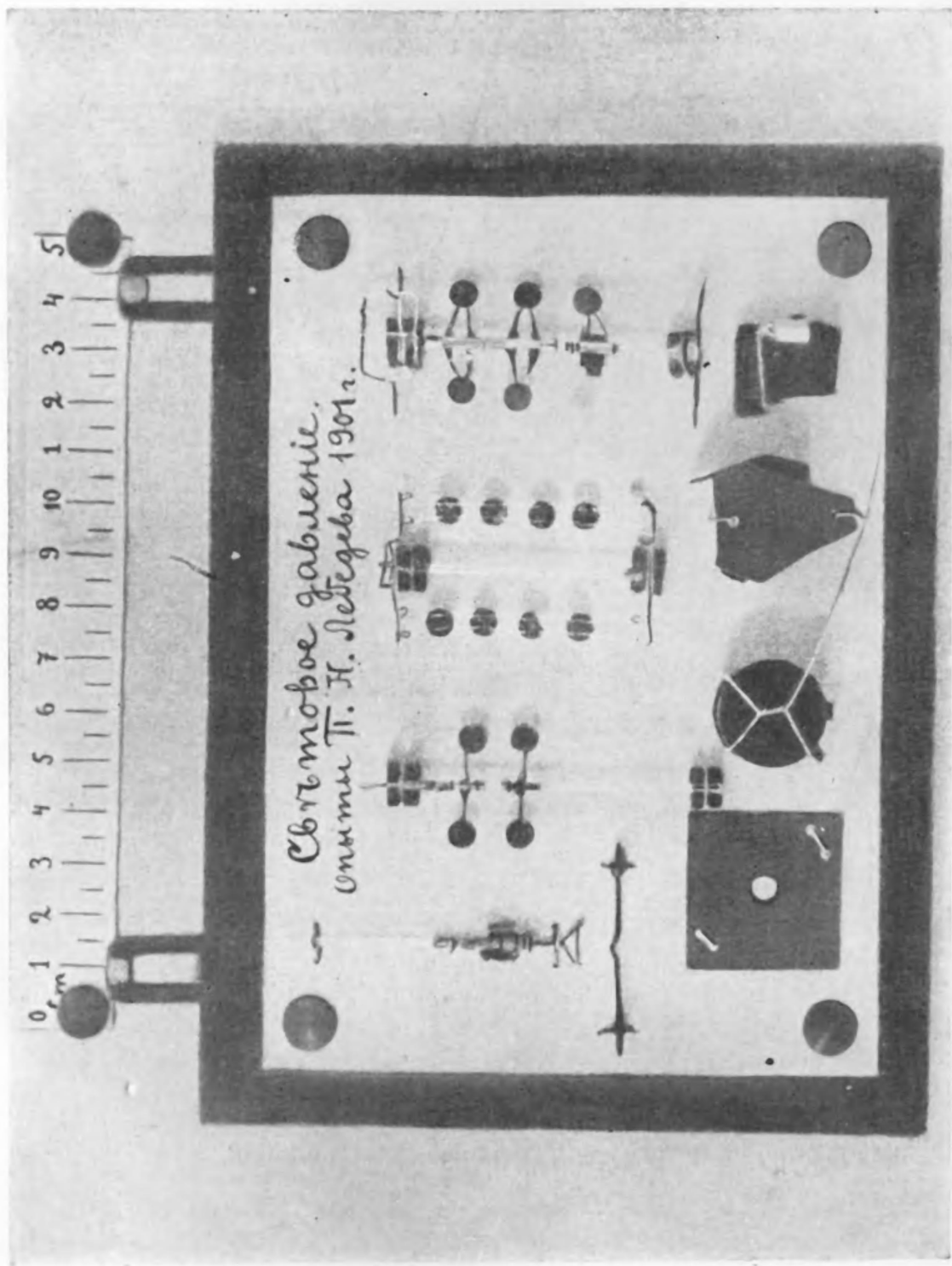
Лаборатория Лебедева в физическом институте Московского университета.



Лаборатория Лебедева при городском университете им. Шанявского.



Приборы П. Н. Лебедева, служившие для опытов с короткими электромагнитными волнами.



Приборы П. Н. Лебедева, служившие для опытов по световому давлению на твёрдые тела.

П.Н. ЛЕБЕДЕВ ~ ИЗБРАННЫЕ СОЧИНЕНИЯ

П.Н. ЛЕБЕДЕВ

Избранные
сочинения

Pa. 3072