



## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОНДЕРО- МОТОРНОГО ДЕЙСТВИЯ ВОЛН НА РЕЗОНАТОРЫ.

### ВВЕДЕНИЕ

Гениальные работы Гертия : открыли исследованию необозримую область явлений, указав приёмы получать и наблюдать электромагнитные волны разной длины. Герти 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 Гертия, 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

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОНДЕРОМОТОРНОГО ДЕЙСТВИЯ волн 85

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 электро- ; динамическими 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 показать<sup>1)</sup>, 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 обуславливается 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. Бредихин<sup>2)</sup>

ЧП. 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.

<sup>2)</sup> 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 резонанса<sup>1)</sup>.

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-

!) P. L e b e d e w, Wied. Ann. 52, 621 (1894). См. ниже, стр. 70-(12. .  
-Г



тельно разработанный в статьях князя Б. Голицына, Обер-бекка 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*<sup>1</sup>) (см. гл. II).

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

. !) P. Lebedew, Wied. Ann. 59, J16 (1895). См. ниже стр. 112-132.





ИССЛЕДОВАНИЕ ПОНДЕРОМОТОРНОГО ДЕЙСТВИЯ ВОЛН 89 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 ступёвывается, 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 \*)). 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 волн<sup>1 2)</sup> 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

---

<sup>1)</sup> P. L e b e d e w, Wied. Ann. 62, 158 (1897). См. ниже, стр. 133-146.

<sup>2)</sup> P. Lebedew, Wied, Ann. 62, 170 (1897), См. ниже, стр.



резонаторы *тождественны*<sup>1</sup>, 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.

Д ~ 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 Watson<sup>1</sup>), 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-

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



ИССЛЕДОВАНИЕ ПОНДЕРОМОТОРНОГО ДЕЙСТВИЯ ВОЛН  
91 деромоторного действия электромагнитной волны на резонатор, в зависимости от резонанса, был в основных чертах выяснен, и я приступил к его выполнению, несмотря на неудачу Воус'а и др., так как работы Гертца<sup>1)</sup> 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 Гертца, 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

т)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 втором. 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  $E_2$  и  $E^1$

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  $de$  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  $Z$  отведён к

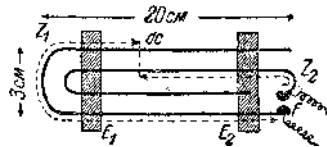


Рис. 10.

земле; такая особенность конструкции возбу

дителя является необходимым условием, чтобы отклонения подвешенного резонатора были обусловлены исключительно действиями колебательных зарядов, без примеси прямых электростатических сил, действие которых так резко ска-

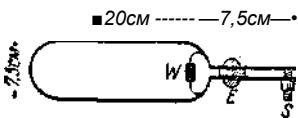


Рис. 11.

зывается в первичных проводниках Гертца. Искра перескакивала между двумя платиновыми колпачками<sup>2)</sup>  $F$ . Для возбуждения служил маленький индукторий, который при трёх аккумуляторах давал 40 разря-

дов в секунду. Длина волны

измерение длин волн соответствующих ему вспомогательных резонаторов, была около  $l = 350$  см.

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  $l_1 = 320$  см до  $l_2 = 380$  см) и настраивать его в резонанс





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 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.

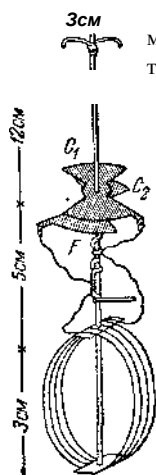


Рис. 12.

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

3. *Магнитный резонатор* изображён на рис. 12. Весь резонатор укреплён 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 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  $l = 280$  см до  $l = 420$  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,



ИССЛЕДОВАНИЕ ПОНДЕРОМОТОРНОГО ДЕЙСТВИЯ ВОЛН 95 на стеклянном стержне устроен искровой микрометр  $F$ : искра образуется между двумя платиновыми ушками, из которых одно можно достаточно удобно уставлять при помощи выступающей проволоочки (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 перескакивать.

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  $45^\circ$ , 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

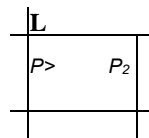


Рис. 13.



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.

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  $O, G$ . 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.

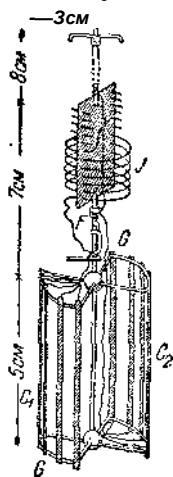


Рис. 14.

Общий вес этого резонатора был 0,8 г.

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

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



## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОНДЕРОМОТОРНОГО ДЕЙСТВИЯ ВОЛН

97 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  $45^\circ$ , 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).

7 П. Н. Лебедев

Й. И. ЛЕБЕДЕЙ

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 Rive<sup>3)</sup> 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 Бьеркнес<sup>4 5)</sup>, Blondlot<sup>8)</sup> и Perot<sup>6)</sup>, причём, однако, следуя Герццу<sup>7)</sup>, 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'a в непосредственной близости резонанса указывает Биркеланд<sup>8)</sup>; когда длина волны, соответствующая

---

<sup>3)</sup> E. Sarasin et de la Rive, Archives de Geneve (3) 23, 113 (1890); 29, 441 (1893); Beibl. 14, 419 (1890); 17, 967 (1893).

<sup>4)</sup> V. Bjerknes, Wied. Ann. 44, 78 (1891).

<sup>5)</sup> R. Blondlot, Journ. de Phys. (2) 10, 558 (1891).

<sup>6)</sup> A. Perot, Gomp. rend. 114, 1528 (1892).

<sup>7)</sup> H. Hertz, Wied. Ann. 34, 558 (1888).

<sup>8)</sup> 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 независимости 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

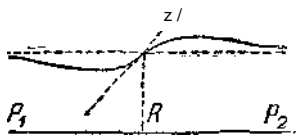


Рис. 15.

Бир-келанду максимальное отступление может доходить до  $+0,04 X$ ; 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 аperiодическому, 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 Бьеркнеса<sup>1)</sup> ставил коллекторные пластинки, связанные с проволоками, весьма близко к обкладкам первичного проводника; благодаря такому приёму

<sup>1)</sup> V. Bjerknæs, Wied. Ann. 44, 524 (1891),



максимальное отступление упало до  $+0,0031$ , и от него легко было избавиться, делая определения при двух длинах волн первичного проводника, отличающихся от полного резонанса на  $+0,1 \lambda$ , 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 81) параллельные медные проволоки были связаны между собой, как мостом, широкой металлической пластиной (по ту -сторону этого моста электромагнитные

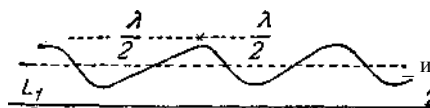


Рис. 16.

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  $+0,031$ ; 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 Биркеланда<sup>1)</sup>,

<sup>1)</sup> К. В i r k e l a n d, Compt rend. 116, 93 (1893); Weibl. 17, 1099 (1893).



## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОНДЕРОМОТОРНОГО ДЕЙСТВИЯ ВОЛН

Ю1 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.  $+0,003 X$ ), 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  $+0,05X$ , тогда как указанный мною приём даёт возможность измерять указанную величину до  $+0,003 X$  свободной от систематических ошибок.

### б) Окончательное расположение.

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

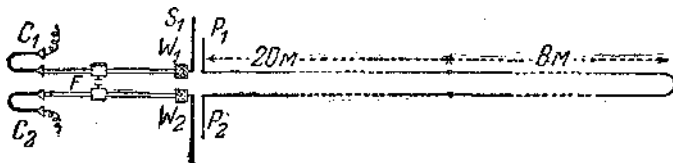


Рис. 17.

между проводниками 6 см), вдоль которых можно было перемещать искровой промежуток  $F$ , погружённый в вазелиновое масло<sup>9</sup>); трубки  $C_1$  и  $C_2$  со столбиками воды были включены между ним и индуктором для избежания слишком тёплых искр<sup>10</sup>). Помощью двух сопротивлений и  $1F_2$ , 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

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

<sup>9</sup>) Sarasin et de la Rive, Compt. Rend. 115, 439 (1892); Arch. de Geneve (3) 28, 306 (1892); Beibl. 17, 597 (1893).

<sup>10</sup>) T Spier, Wied., Ann. 46, 467 (1892).

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. Geitler<sup>1)</sup>, 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 резонатора<sup>2)</sup> и лежали в пределах от  $X_j$  — 260 см до  $X_2 = 460$  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»<sup>3)</sup> резонатора нельзя делать очень малым, самая подходящая для него величина оказалась 0,15X. При некотором навыке

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

2) Vjerknes, цит. выше, стр. 78.

3) Влодот, цит. выше, стр. 558.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОНДЕРОМОТОРНОГО ДЕЙСТВИЯ ВОЛН ЮЗ

легко получать замечательную точность: так, отдельные отсчёты обыкновенно не отличаются друг от друга больше чем на + 0,005 X.

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 X 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 заранеe 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  $X$  резонатора.

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

$J$  — наблюдаемое отклонение индикатора в делениях скалы.

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

| $p$  |   | $l$       | $J$ | $R$                | $T?J=180$ |
|------|---|-----------|-----|--------------------|-----------|
| 300  | к | 333       | 184 | 4 <sup>“</sup> 8,3 | 4~8,1     |
|      |   | 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 | 4-7,6              | 4-7,5     |
|      |   | 328       |     |                    | 4-7,6     |
|      |   | 331,5 ±2. |     |                    |           |

$l = 331 \text{ см} \pm 2$ ;  $Rj^{\wedge} = 4-7,6 \pm 0,4$ .

$T?$  — наблюдаемое отклонение резонатора в делениях скалы при определении крутильных сил; о знаке см. ниже.  $Rj \sim 180$  и  $Rj \sim 40$  — отклонения резонатора, приведённые к отклонению индикатора в 180 и в 40 делений скалы.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОНДЕРОМОТОРНОГО ДЕЙСТВИЯ ВОЛН « Ю7

| $p$      | $1$      | $J$ | $R$   | $T_{\tau=40}$ |
|----------|----------|-----|-------|---------------|
| 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<br>< | 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±2. |     |       |               |

$$l = 375 \text{ см} \pm 2; /?_{\tau=40} \sim \text{—} 15,7 \pm 0,9.$$

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  $X$  и  $R$  имеют вышесказанное значение. Что касается до знака при то (-ф-) 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 пон-деромоторных сил; по абсциссам отнесены  $l$ , а по ординатам  $v$  обозначает длину волны вибратора.

Таблица I. Магнитный резонатор.

| N | X         | $\lambda=180$ | / 1 53<br>/ П<br>$v' it$    |
|---|-----------|---------------|-----------------------------|
| 5 | 301 ± 2   | к 3,4 + 0,4   | —V'Л                        |
| 4 | 311 ± 2   | — 3,8 ± 0,3   | S*<br>■§; /                 |
| 3 | 331 + 2   | — 7,6 + 0,4   |                             |
| 2 | 340 + 2,5 | 1- 14,8 + 1,0 | «B <sup>1</sup><br>Рис. 18. |
| 8 | 351 + 2   | — 52,0 + 3,0  |                             |
| 1 | 371 + 1,5 | — 18,8 + 0,6  |                             |
| 7 | 389 + 2   | — 8,5 + 0,2   |                             |
| 6 | 414 + 2,5 | — 4,5 + 0,3   |                             |

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

Таблица II.

Электрический резонатор.

|   | X         | $\lambda=40$ |
|---|-----------|--------------|
| 7 | 283 + 1   | + 7,6 + 1,3  |
| 4 | 323 ± 1,5 | + 14,6 + 0,5 |
| 6 | 333 + 1,5 | + 19,5 + 2,4 |
| 5 | 359 + 2   | — 22,6 + 1,4 |
| 3 | 376 + 2   | — 15,7 + 0,9 |
| 2 | 389 + 1,5 | — 8,1 + 0,8  |
| 1 | 418 + 1,5 | — 4,7 + 0,5  |

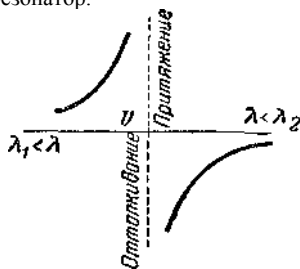


Рис. 19.

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

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<sup>^</sup>



## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОНДЕРОМОТОРНОГО ДЕЙСТВИЯ ВОЛН « Ю7

*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. И), 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:

$$f(t) = ae^{-at} \cos at, \tag{A}$$

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

Если мы предположим, как это делает Бьеркнес<sup>1)</sup>, 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  $\langle p(t) \rangle$ :

$$\langle p(t) \rangle = Ae^{-at} \sin(at) + Be^{-bt} \sin(bt). \tag{B}$$

Здесь постоянные имеют следующие значения:  $aa'$

$$A = \frac{e^{-a' t} \dots}{4(a-p)^2 - d^2} \dots; \quad a > \arctan \frac{1}{2d} \dots$$

$$a = \arctan \frac{1}{2d} \dots \quad a - p \dots$$

$$b = \arctan \frac{a^2 - a'^2}{2aa'} \dots$$

Амплитуда  $A$  имеет тот же знак, что  $p - a$ , а фазы  $a'$  и  $b'$  лежат между  $-\pi$  и  $-\pi/2$ .

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:

$$dK = f(t) \langle p(t) \rangle dt. \tag{C}$$

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



Если мы будем под словом «движение» понимать 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.

со

(D) o

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

$$K = \frac{A\pi}{2} \left[ \frac{\sin a' (a \sin a' - J - a \cos a' \dots)}{2(a^3 + a^3) J^{...}} \right]$$

$$\int \frac{B \ddot{u} \text{ ГОЧ-?} \sin^5 \dots}{(a + N_0 + (a \sim \xi)^2)} \cdot (\& \text{---} a) \cos V \cdot (a \text{---} (!) \sin ft' \text{---} \text{Ha-f-S}) \cos^4 \dots$$

$$(a-H)^2 + (a + *)^3$$

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

- $B = -A;$   
 $tgb' = tga'.$

После соответствующих преобразований получаем:

$$d \sim \frac{a^2 (6^2 - \gamma^2) a^2 \Gamma 1}{(\gamma^3 - a^2)^3 + 4a^2 (a - p)^2} \Big|_{2\ll} \left[ \frac{2?}{(a + P)^3 + (B - a)^2} \right] \cdot (2)$$



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

$$\frac{a^2 a(b - a)}{4a'(a + P)2a} \quad (3a)$$

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

$$= 4a'$$

Оба уравнения (3a) и (3б) можно написать несколько иначе, если мы введём количество энергии, падающей на резонатор. Для каждого элемента времени  $dt$  количество энергии  $dE$ , проходящее через среду, пропорционально  $[(r')]^{2\wedge}$ ; количество энергии  $E$ , попавшей за всё время на резонатор!):

$$E = a^2 \int_0^{\infty} \dots dt \quad 4л$$

Поэтому можем написать:

$$\frac{ZZ - r' d(b - \ddot{y})}{\dots} \quad \text{O)}$$

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

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  $\{b - a\} - zb \text{ I Oa}$ .

1) См. V. Vjerknes, 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 энергии и количеству падающей на него волны, а не от их отношения чисел колебания, 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  $(b - \alpha) = \pm (\alpha - p)$  и достигают при прочих равных условиях значений, обратно пропорциональных  $(a - p)$ .

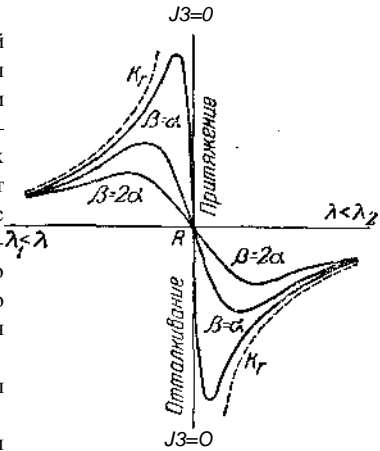


Рис. 20.

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 затухание  $a$  надо считаться с колебаниями первичного проводника, которые быстро затухают благодаря большому затуханию у возбудителя; вследствие этих колебаний надо принимать в расчёт в выражениях (I) и (II)' поправочные члены, величины которых относятся к  $K$  как  $a$  и  $u$ , а так как  $a$  по сравнению с  $u$  очень мало



(по Бьеркнесу <sup>1)</sup>) отношение  $\sim$  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 *молекулярные сил*, которые обусловлены взаимным лучеиспусканием молекул.

## ГЛАВА II.

### ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЗОНАТОРЫ.

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

<sup>1)</sup> V. Bjerknes, цит. выше, стр. 89.



ИССЛЕДОВАНИЕ ПОНДЕРОМОТОРНОГО ДЕЙСТВИЯ ВОЛН ЦЗ опытами <sup>1)</sup>, 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 рег зонатор, 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 аналогии <sup>2)</sup> 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.

## И. 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. Бьеркнес<sup>11 12)</sup>). 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

---

<sup>1)</sup> С. А. В j e r k n e s, Exner's Rep. 19, 289 (1883).

<sup>12)</sup> С. А. В j e r k n e s, Exner's Rep. 19, 309 (1883).





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

По отношению к осциллирующему шарика резонатор располагался как в направлении поляры, так и в экваториальной плоскости, что давало возможность исследовать интересующие 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

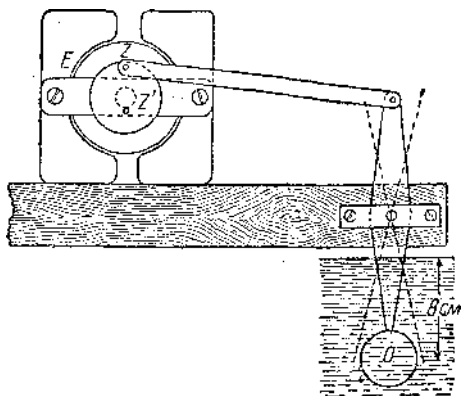


Рис. 21.

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



## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОНДЕРОМОТОРНОГО ДЕЙСТВИЯ ВОЛН

115 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  $\sim 1$ HP) присоединялся к проводам электрической станции, как шунтовая скорости в главную цепь включалось сопротивление

которое подбиралось так, что число оборотов было немного менее, а при коротком замыкании части  $\gamma'$  — несколько более того, которое требовалось.

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  $\gamma'$ ; 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 тока<sup>13)</sup>, и процесс начинается заново.

динамо; для регулирования

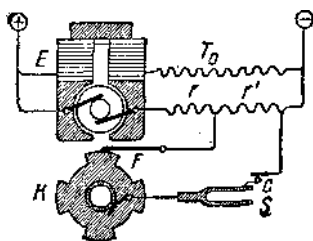


Рис. 22.

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 ровно 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 удобным<sup>1)</sup>.

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 камертона<sup>14)</sup>.

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

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),

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

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



# ИССЛЕДОВАНИЕ ПОНДЕРОМОТОРНОГО ДЕЙСТВИЯ ВОЛН

Ц7

укрепленного на конце плоской стальной пружины  $F$  (ширина  $\xi \approx 2,1$  мм, толщина  $\approx 0,75$  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.

Для того чтобы проверить полученные результаты, были сделаны опыты также с другим резонатором, шарик медный ( $\xi' = 15$  мм), а плоская стальная шире ( $\xi' = 11$  мм,  $c\Gamma =$

на  
=  
кл  
ре  
пс

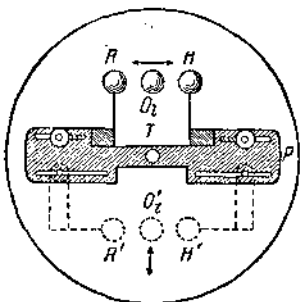


Рис. 24.

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. 23.

которого был пружина была на гораздо более резонатор укреплялся при помощи той же которое соответствовало по размерам шарика, поверхность которого была этот шарик укреплялся

жёсткой (менее гибкой) пружине; он привинчивался к крутильному прибору при помощи такой же клеммы, как и резонатор.

5. крутильный прибор, при помощи которого определялась разница действия





(вид сверху) видно расположение осциллирующего шарика  $O$  и  $O'$  и соответствующее укрепление резонатора  $R$  и  $R'$ , а также компенсирующего тела  $I$  и  $I'$  для исследования продольных колебаний в первом и поперечных колебаний во втором случае. Для того чтобы стержень  $T$  удержать 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* ( $\rho=0,38$  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-



## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОНДЕРОМОТОРНОГО ДЕЙСТВИЯ ВОЛН

119 ные резонансом, всегда слабо выражены, обыкновенно наблюдалась небольшая крутящая сила, действующая в ту или в другую сторону и обусловленная незначительной случайной асимметрией в расположении крутильного прибора по отношению к осциллирующему шарик; 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. 11,2) 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. 11,5) подводилась 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  $\theta^{\wedge} = 23$  мми  $a_2 = 11$  жл/(см. II, 1). W обозначает номер наблюдений,  $n$  — число полных колебаний шарика В одну минуту,  $Q^0$ —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

t

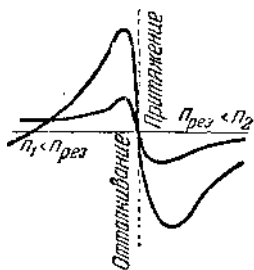


Рис. 25.

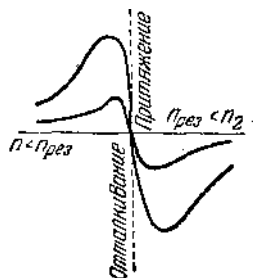


Рис. 26.

$n$  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  $A = 11$  см.)

| $= 23$ мм |      |           | $a_2 = 11$ мм |      |           |
|-----------|------|-----------|---------------|------|-----------|
| $N$       | $n$  | $0^\circ$ | $N$           | $n$  | $0^\circ$ |
| 22        | 807  | - 1,0     | 21            | 808  | -0,8      |
| 1         | 827  | - 2,8     | 18            | 836  | -1,2      |
| 3         | 844  | - 9,3     | 29            | 845  | - 1,8     |
| 2         | 852  | - 15,5    | 19            | 858  | -2,5      |
| 4         | 8Z0  | -29,0     | 13            | 857  | -7,0      |
| —         | — ■  | —         | 11            | 873  | -5,8      |
| 10        | 830  | - 20,5    | 14            | 881  | -8,7      |
| 8         | 881  | См. прим. | — ■           | —    | —         |
| 7         | 894  | -2i.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 неопределенны. ■

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОНДЕРОМОТОРНОГО ДЕЙСТВИЯ ВОЛН 121

Таблица IV.

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

| $a_1 = 23$ мм |      |           | $a_2 = 11$ мм |      |             |
|---------------|------|-----------|---------------|------|-------------|
| $N$           | $n$  |           | $N$           | $n$  | $\text{®}2$ |
| 19            | 814  | -20,7     | 18            | 812  | + 3,9       |
| 1             | 829  | -29,3     | —             | —    | — ■         |
| 21            | 851  | И-80,0    | 17            | 857  | -18,7       |
| 2             | 858  | 1-77,5    | 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. Бьеркнес<sup>1)</sup>, *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 резонатора<sup>15 16)</sup>, причём кажущаяся скорость их движения была в шестьдесят раз медленнее действительной (приблизительно одно колебание в 4 секунды); наблюдение разницы фаз, не зависящей от стробоскопического замедления колебаний, при таком медленном движении не представляет уже никаких затруднений.

Для последующих соображений было достаточно установить только

1) C. A. Bjerknæs, Rep; fiir reine und angewandte Mathematik von L. Königsberger und G. Zenner 1, 264 (Leipzig, 1877); Exner's Rep. 19, 288 (188J).

<sup>16)</sup> Крутильный прибор при этих опытах закреплялся неподвижно. . .

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

<sup>2)</sup> C. A. Bjerknæs, Exner's Rep. 19, 298—299 (1883).

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

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



## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОНДЕРОМОТОРНОГО ДЕЙСТВИЯ ВОЛН 123

знак разницы фаз, а не абсолютную ей 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 2°/о

|  | Z7 <<br>(Притяжение)                          |   |   | Пр&З |    |   | През <°2<br>(Отталкивани) |    |
|--|---|---|---|------|----|---|---------------------------|----|
|  | Движен. резонатора<br>при<br>колебании шарика | А | И | Л    | ИХ | Ч | ТХ                        | А  |
| Врпни8Н.резонаторапри)т<br>поперечных наделениях т | Z   | Л | Л | ЛГч  |    |   | Ч2                        | ИИ |

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 регулятором!), как в фонографе Эдисона. Этот регулятор и давал короткое замыкание сопротивления  $z'$  (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 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, Бьеркнес!) нашёл для колебаний продольных и для поперечных по отношению к линии их соединения разные законы.

*Для продольных колебаний.*

а) Шарик притягивается, когда движения их направлены в разные стороны.

б) Они отталкиваются, когда движения их совпадают.

*Для поперечных колебаний.*

а) Шарик притягивается, когда движения их совпадают.

б) Они отталкиваются, когда движения их противоположны.

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 движется 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 резонансом <sup>1)</sup>).

Мы рассмотрим сначала движение жидкости, вызываемое осциллирующим шаром, далее перейдём к рассмотрению, как действует эта жидкость на помещённый в ней 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.

Если шарик (радиуса  $R$ ) движется в данной жидкости с постоянной скоростью  $S_0$  в направлении оси  $x$ , то потенциал скоростей  $\Phi$  в окружающей жидкости имеет значение  $\Phi$ ):

$$\Phi = S_0' \frac{R^3}{2} \frac{\partial \left( \frac{1}{r} \right)}{\partial x} = S_0' R^3 \cos \theta$$

где  $r$  — радиус-вектор и  $\theta$  — полярный угол;

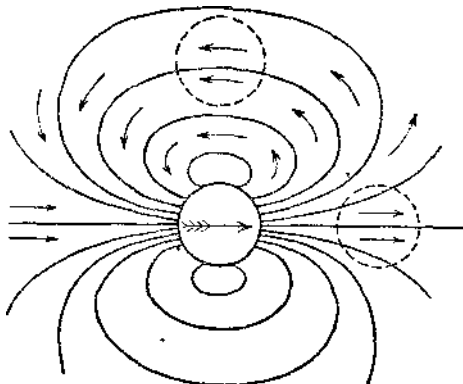


Рис. 28.

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

$$v = \frac{\partial \Phi}{\partial r} = -\frac{S_0' R^3}{r^3} \cos \theta$$

$$w = \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} = \frac{S_0' R^3}{r^3} \sin \theta$$

Течение жидкости изображено на рис. 28.

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

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  $z$  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):

$$\begin{aligned} v_z &= 0; \quad w_z = S_0 \sin \alpha; \\ v_t &= \frac{S_0}{2} \left( \frac{R}{r} \right)^3; \quad W_t = 0. \end{aligned}$$

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

Положим, что наш осциллирующий шарик совершает незатухающие синусоидальные колебания:

$$S_0 \sim C_0 \sin at. \tag{A}$$

Здесь  $C_0$  пропорционально максимальной скорости,  $a$  — числу колебаний; тогда движение жидкости для двух главных положений представится:

$$\left. \begin{aligned} v_t &= + \frac{C_0}{2} \left( \frac{R}{r} \right)^3, \\ v_t &= - \frac{C_0}{2} \left( \frac{R}{r} \right)^3. \end{aligned} \right\} \tag{A'}$$

Если осциллирующая жидкость имеет скорость  $S' = C' \sin at$ , 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  $f = C_x$  — некоторая постоянная  $C_x$ :

$$\frac{d^2 S'}{dt^2} = A \cos at. \tag{B}$$

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 затухают <sup>1)</sup> и через некоторое время исчезнут; тогда установится конечное стационарное состояние, и надо принимать в расчёт только принуждённое колебание.

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

$$S' = C_2 \sin(\omega t + \phi). \quad (C)$$

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 значения<sup>2)</sup>:

■ 
$$S' = \frac{C_2 \sin(\omega t + \phi)}{\sqrt{1 - \frac{B^2}{\omega^2}}},$$

и далее, принимая во внимание (D):

$$S' = \frac{C_2 \sin(\omega t + \phi)}{\sqrt{1 - \frac{B^2}{\omega^2}}}. \quad (C')$$

$$\phi = \arctan \frac{B}{\omega}, \quad \text{где } B \text{ пропорционально числу колебаний собственного тона резонатора, а}$$

пропорционально его затуханию.

<sup>1)</sup> 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.

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

Из (С') следует, что для  $Z >^{17} \text{ }^{18} D^2 = a^2$ , т. е. при полном резонансе, амплитуда колебания достигает максимума, причём фазы движения отличаются друг от друга на  $\sim$ .

Если резонатор настроен выше возбуждающего колебания ( $\omega > a$ ), 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. Бьеркнес<sup>1)</sup> вычислил притягательную силу, имеющую место в любой момент времени для случая пондеромоторного взаимодействия двух осциллирующих шариков, радиусы которых равны соответственно  $r_0$  и  $r$  и которые находятся друг от друга на расстоянии  $g_0$ . Если скорости шаров равны соответственно,  $s^{\wedge}$  и  $s'$ , то сила  $p$  может быть представлена<sup>2)</sup>:

$$p = \frac{1}{2} \rho v^2 \left( \frac{g_0}{r_0} + \frac{g_0}{r} \right) \cos^2 \left( \frac{g_0}{r_0} - \frac{g_0}{r} \right).$$

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

$$\left. \begin{aligned} K_l &= -2s_0' s_r' \frac{\pi R_0^3 R_r^3}{r_0 r^4}; \\ K_t &= \frac{1}{2} s_0' s_r' \frac{\pi R_0^3 R_r^3}{r_0 r^4}. \end{aligned} \right\} \quad (D)$$

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

<sup>1)</sup> С. А. Bjerknæs, Repertorium der reinen und angewandter Mathematik von L. Königsberger und G. Zeuner 1, 264 (Leipzig, 1877).

<sup>2)</sup> Там же, стр. 263, 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:

$$K, dt_1 = \dots \sin at \cos (at - a')$$

$$K, dt_2 = \dots \sin at \cos (at - a')$$

Эти выражения показывают, что, за исключением фактора 4, поперечные 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:

$$Kdt = \dots \frac{\sin at \cos (at - a')}{a^3 + 4a^3} \tag{E}$$

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

$$\int_0^m \sin at \cos (at - a') dt = a$$

$$\frac{1}{2} \int_0^m \sin at \cos (at - a') dt = \dots$$

*a'* из (C') и опуская...

$$\frac{a^3 (i^3 - H^3 - a^3)}{(6^3 + P - a^3)^3 + 4a^3}$$

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 до тех пор, пока  $(b^2 - a^2)$  можно заменять через  $2a(b-a)$ , а также и для случая, когда мы отвлекаемся от области резонанса.

В этих случаях притягательные силы:

$$- \frac{a(b-a)}{a^2} \cdot \dots \quad (I)$$

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

Рис. 29 иллюстрирует зависимость на резонатор, в том случае, когда 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  $(b-a) = \pm 10^4$ ; так как  $f$  по предположению мало, то и возра

сил, действующих период резонатора

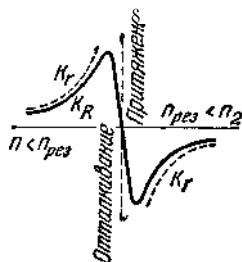


Рис. 29.

стание энергии  $E$  в этом интервале очень мало, и поэтому кривая симметрична по отношению к области полного резонанса.

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.

9\*

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

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 закономерности <sup>1)</sup>.

## 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.

Бьеркнес<sup>20 21)</sup> доказал, для независимых гидродинамических движений, существование *обратной* аналогии с электрическими и магнитными действиями на расстояние.

### 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 расчленив 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 Guyot и Schellbach<sup>1)</sup> 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

<sup>1)</sup> 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.

<sup>21)</sup> С. А. Bjerknæs, *l'ep. fur Math.*, цит. выше, стр. 271; Exner's Rep. 19, 288 (1883).

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

потоков и т. д.

б) *Реакционные силы*, испытываемые всяким звучащим телом в направлении, обратном направлению излучаемой 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 Дворжаком<sup>1)</sup> 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 возбуждённого 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 перепонками<sup>22 23)</sup>, 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 возбуждённого 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.

## I. Расположение опытов.

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

---

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

<sup>23)</sup> V. Dvorak, Ber. d. Wien. Akad. 84 (II Abth.), 710 (1882).



## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОНДЕРОМОТОРНОГО ДЕЙСТВИЯ ВОЛН

135 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  $45^\circ$  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

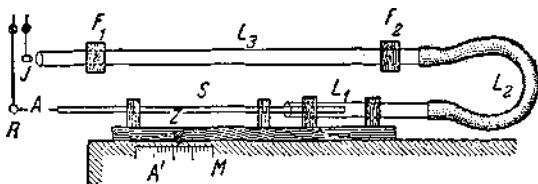


Рис. 30.

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  $MM$ ), не изменяя при этом условий действия другого конца стержня на индикатор  $J$ ).

и) 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 5 в 155 см длины и 2,2 см диаметра, снабжённой пробковым диском и открытой стеклянной резонаторной трубкой А; при возбуждении<sup>1)</sup> трубка давала  $X=100$  мм (в воздухе). Труба  $L$  (внутренний диаметр 4,4 см) всегда

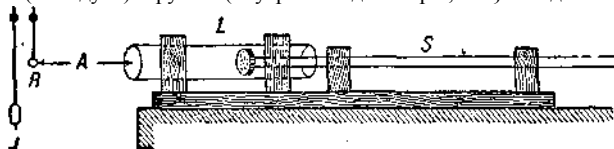


Рис. 31.

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 зонатора  $d_2 = 11$  мм. Край  $\ll p = 8$  мм, у резонаторов были отшлифованы. Передвигая пробковое доннышко 5, можно было по желанию изменять длину воздушной колонны  $I$  и легко измерять её помощью масштаба; задний конец резонатора  $M$  был закрыт пробкой  $K$ . Каждый резонатор имел две петли  $O_1$  и  $O_2$ , которые служили для подвешивания его к крутильному прибору, препятствовала «сдуванию» резонатора реакционными силами.

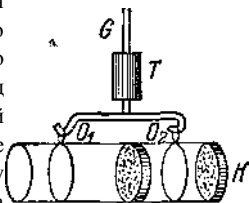


Рис. 32.

За. Индикатором в опытах с кундтовским стержнем (рис. 30) служил неизменяемый резонатор, настроенный на как то указано на рис. 32 и 33. Массивная клемма  $T$  максимальное возбуждение, прикрепленный к коромыслу кру-

<sup>\*</sup>) 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 Дворжака<sup>1)</sup>, так, чтобы реакционные силы могли вращать его; отверстием он был обращён к трубке  $Z_3$  (рис. 30), и величиной крутящих сил измерялась степень возбуждения кундтовского стержня.

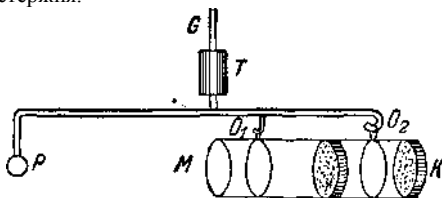


Рис. 33.

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  $45^\circ$  с плоскостью падающей на него волны<sup>24 25)</sup>.

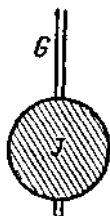


Рис.

массы и  $M_2$ ,

4. Крутильный прибор (рис. 35) был одинаково устроен как для индикаторов, так и для резонаторов: стеклянный стержень был подвешен к тонкой металлической проволоке (платиновой,  $gf_j = 0,05$  мм,  $L_2 = 2,5$  см, или серебряной,  $gf_3 = 0,1$  мм,  $L_3 = 45$  см), причём каждый чтобы мал, к рамке успокоителя были прикреплены металлические

прибор имел свой успокоитель; пластинка  $F$  была погружена в сосуд  $D$ , наполненный маслом; период колебания всей системы был не особенно

благодаря которым колебания ( $\tau/2 = 7$  сек. и 9 сек.) совершались достаточно медленно для удобного отсчёта точек поворота.

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

<sup>25)</sup> Относительно применения диска Рэля к измерению интенсивности звука см. E. Grims ehl, Wied. Ann. 34, 1028 (1888).

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 од

новременно возбуждать кундтовский стержень и делать отсчёты в трубу.

Как резонатор, так и индикатор были защищены от случайных воздушных течений проволоочной 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-

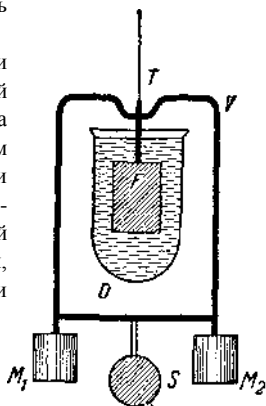


рис 35

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.

|           | А <sub>1</sub> — 1 см |       | Д <sub>2</sub> — 2 см |       | С <sub>1</sub><br>Π | Π      | Π     | С <sub>0</sub><br>Π<br>40 т: |
|-----------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|---------------------|--------|-------|------------------------------|
|           | набл.                 | попр. | набл.                 | попр. |                     |        |       |                              |
| l = 5 мм  | - 85                  | 0     | - 2,2                 | 0     | - 0,1               | 0      | 0     | 0                            |
| l = 17 мм | Р-                    | 412   | - 7,5                 | 4 5,3 | - 1,5               | 4- 0,4 | 4-0,6 | 0,0                          |
| l = 19 мм | Г-                    | 238   | Г-Ю.7                 | 4 8,5 | - 1,8               | 4- 0,5 | 4-0,5 | -0,1                         |
| l = 20 мм | l-                    | l-    | -10,5                 | - 8,3 | - 2,1               | + 0,5  | + 0,3 | - 0,3                        |
| l = 21 мм | l-                    | 473   | - 4,5                 | - 6,5 | - 8,4               | - 7,1  | - 5,0 | -1,3                         |
| l = 22 мм | -400                  | -485  | -65,0                 | -67,2 | -22,0               | -11,0  | -3,1  | - 1,5                        |
| l = 23 мм | -232                  | -317  | -27,0                 | -29,2 | - 7,6               | - 3,4  | - 0,9 | - 0,3                        |
| l = 24 мм | - 59                  | -144  | - 9,7                 | -11,9 | - зл                | - 1,7  | - 0,5 | - 0,3                        |
| Z = 26 мм | 4- 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  $A_1 = 1$  см и  $D_2 = 2$  см приведены помимо непосредственно наблюденных 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  $l$  отчёты 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 наблюденных отчётов. 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 послед

него узла от открытого конца трубки. Для употреблённой длины волны  $\lambda = 94$  мм это последнее расстояние оказалось  $Z_r = 21,5$  мм, а следовательно, поправка на открытый конец  $\sigma = 2$  мм.

- Характер действующих на резонатор пондеромоторных сил в непосредственной близости от источника ( $4j = 1$  см) графически представлен на рис. 36; здесь по абсциссам отложены длины волн резонатора, а по ординатам — действующие на него пондеромоторные силы;  $\nu$  обозначает длину волны источника.

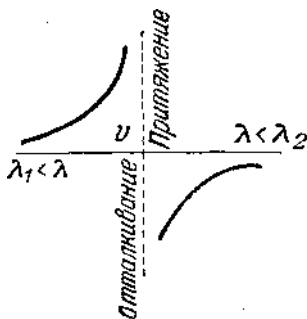


Рис. 36.

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 Дворжак<sup>1)</sup> для случая настроенных перепонок.

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

1) V. Dvo'rak, Ber. d. Wien. Akad. 84 (II Abth.), 710 (1882). Эти результаты можно, опираясь на опыты Стро (Stroh, 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 ( $D_0=10$  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  $D_0 = 21$  см от отверстия кунд-





## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОНДЕРОМОТОРНОГО ДЕЙСТВИЯ ВОЛН

143 товской трубки, притом так, чтобы ось резонатора составляла угол в  $45^\circ$  с направлением звука, и уменьшая эффект непосредственного действия звуковых колебаний на тело резонатора металлической пластинкой (в  $2 \times 3$  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, отнесенные к некоторому определенному 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 определенная, как было указано выше,  $l_r = 21,5$  мм.

Таблица VI.

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

В таблице VI рядом с наблюдаемыми («наблюд.») средними величинами приведены также средние колебания отдельных отсчетов, 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.

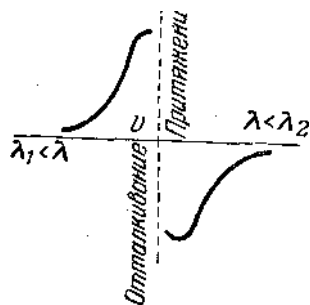


Рис. 37.

37, где по абсциссам отложены длины волн резонатора (и означает длину волны источника), а по ординатам отложены величины соответствующих вращающих сил.

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*

*жат вблизи резонанса.*

Силы давления плоской волны, силы, стремящиеся уве

ниже. 2. Максимумы этих противоположных действий лести 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. |
|------------------------------|------------------|---------|----------|
| $I \sim 2 \text{ мм}$ .....  | 0                | 0       | 0        |
| $I \sim 17 \text{ мм}$ ..... | — 11             | 0       | — 14     |
| $I \sim 19 \text{ мм}$ ..... | — 13             | + 0,1   | — 13     |
| $I \sim 20 \text{ мм}$ ..... | — 53             | + 0,9   | — 54     |
| $I \sim 21 \text{ мм}$ ..... | — 155            | + 1,3   | -156     |
| $I \sim 22 \text{ мм}$ ..... | — 101            | -1,0    | — 100    |
| $I \sim 24 \text{ мм}$ ..... | — 3 <sup>9</sup> | — 0,6   | — 2.     |
| $I \sim 26 \text{ мм}$ ..... | — 1              | — 0     | — 1      |

В таблице VII приведены кроме результатов наблюдения («наблюд.») ещё и вычисленные силы вращения («вращен.»), налагающиеся на исследуемые силы оттал

кивания: 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 кундтов-скую трубку почти в 10 раз слабее (чему соответствовало и в 10 раз меньшее отклонение индикатора); в столбце «поправл.» ставляет зависимость этих отталкивательных сил от резонанса.

приведены силы отталкивания, по лучаемые из наблюдений, если поправить эти последние на примешанные к ним небольшие силы вращения. Рис. 38 пред

Чтобы убедиться, что наблюденные 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  $I$  воздушной колонны резонатора кундтовская трубка то находилась в прежнем положении, то помещалась на том же рас- 10 П. Н. Лебедев

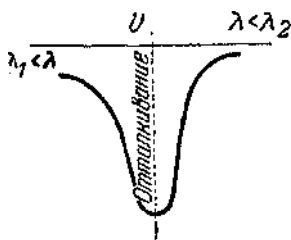


Рис. 38.

стоянии от оси вращения, но была перенесена на  $90^\circ$  вокруг этой последней, т. е. находилась на  $45^\circ$  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  $D_6 = 10$  с.и.

Наблюденные 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

. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОНДЕРОМОТОРНОГО ДЕЙСТВИЯ ВОЛН 147  
акустических резонаторов отличны; так как мНй--На. удалось поставить соответствующие опыты для L. Электромагнитных волн, я предполагаю в нижеследующем, в соответствии с Дюими прежними исследованиями об электромагнитных резонаторах<sup>1)</sup> 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 исследований<sup>26 27</sup>), 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  $I(t)$ , выражается:

$$I(t) = c \cos at.$$

---

<sup>26</sup>) P. Lebedew, Wied. Ann. 52, 635 (1894); см. выше, стр. 90—112.

<sup>27</sup>) P. L e b e d e w, Wied. Ann. 52,635 (1894); см. выше, стр. 107.





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

$$f(t) = -|a \sin at.$$

Поляризация  $\epsilon(t)$ , 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: ■

$$\epsilon(t) = A \sin \{at - \phi - a'\}.$$

Импульс  $dp$  силы, действующей в направлении распространяющихся волн, для каждого элемента времени  $dt$ :

$$dp = f(t) \delta(t) dt.$$

Для вычисления среднего значения силы давления  $p$  распространяем интеграл на большой промежуток времени; выполняя интегрирование и вставляя соответственные постоянные  $\epsilon$ , находим:

$$p = \frac{PaU}{2\pi N^2 - \epsilon^2 - N\epsilon^2}.$$

Здесь  $E$  пропорционально падающей в единицу времени на резонатор энергии,  $a$  — числу колебаний источника,  $b$  — числу колебаний резонатора и  $0$  — 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-



## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОНДЕРОМОТОРНОГО ДЕЙСТВИЯ ВОЛН

149 нальна затуханию  $0$ , тогда как при больших отступлениях от резонанса она прямо пропорциональна этой величине. Ход изменения этой отталкивательной силы, в-соответствии. с предыдущими исследованиями, изо-

бражён на рис. 39 для постоянной  $L_1 < L_2$  длины волны источника колебаний . и переменной длины волны резонатора; величина  $0 = 0,05a$ . Представленные на рис. 39 кривые для различных. затуханий  $0_1, 0_2$  и  $0_3$  охватывают область  $(a - B) = + 1 00$ .

. 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 вательного действия солниа на кометные хвосты, на что я уже ранее указывал <sup>xxviii</sup>); к сожалению, у нас нет необходимых для вычисления данных относительно величин  $B$  и  $0$ -

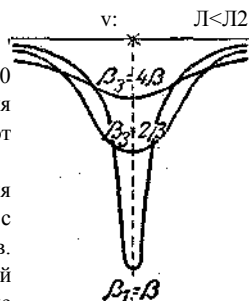


Рис. 39.

изучению отталки-

### 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.

---

<sup>xxviii</sup>) P. L e B e d e -w, Wied, Ann. 45, 297 (1892); с.м. выше, стр. 6Q-  
q5,



Главный интерес исследования пондеромоторного действия <sup>1</sup> волнообразного движения лежит в принципиальной возможности распространить найденные законы на область светового и теплового испускания отдельных молекул тела и предвычислять получающиеся при этом междумолеку-лярные силы и их величину. <sup>2</sup>

Покуда невозможно сказать, в каком направлении должны пойти дальнейшие исследования этих вопросов, <sup>1</sup> чтобы достичь окончательного ответа самым коротким путём: нет никаких данных, позволяющих сказать что-либо определённо о свойствах молекул-резонаторов. Некоторые указания на то, где можно искать дороги с надеждой на успех, нам может дать <sup>1</sup> только спектрально-аналитическое изучение процессов излучения.



<sup>2</sup>) Там же, стр. 636; см. выше, стр. 110.