

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ**РАБОТЫ П. Н. ЛЕБЕДЕВА ПО СВЕТОВОМУ ДАВЛЕНИЮ****В. Фабрикант**

...Я должен работать на  
пределе того, что могу  
вообще осуществить...

**П. Н. Лебедев****I. ВВЕДЕНИЕ**

В этом году исполнились две замечательные годовщины, обе связанные с именем великого русского физика П. Н. Лебедева. Ровно полвека тому назад, в 1900 году, П. Н. Лебедев опубликовал первое сообщение о результатах своей работы по экспериментальному доказательству существования светового давления на твёрдые тела. В 1910 году, сорок лет тому назад, П. Н. Лебедев опубликовал работу по исследованию давления света на газы.

Исследования светового давления доставили Лебедеву мировую славу и по справедливости считаются классическими. Классическими их делают и принципиальная значимость результатов, и поразительное экспериментальное искусство, с которым разрешены все исключительные трудности, стоявшие на пути исследователя. Характерно, что если опыты П. Н. Лебедева по давлению света на твёрдые тела повторялись позднее рядом исследователей, то опыты по давлению света на газы не были никем повторены. Всех отпугивала трудность этих опытов.

При оценке величия научного подвига П. Н. Лебедева следует ещё учесть условия научной работы в царской России, когда отсутствовали специальные исследовательские лаборатории и институты. Сам П. Н. Лебедев в статье «Русское общество и русские национальные лаборатории» ярко охарактеризовал эти условия (стр. 352)<sup>1</sup>. «...Русский учёный, у которого есть и способности и желание работать в области чистой науки, волею судеб поставлен в особенно тяжёлые условия, благодаря крепостной зависимости от



ПЕТР НИКОЛАЕВИЧ  
ЛЕБЕДЕВ



учебных учреждений, и если мы теперь, в годовщину 19-го февраля, с жутким чувством читали воспоминания о том, как баре помыкали своими крепостными художниками и заставляли их красить заборы, то может быть с таким же жутким чувством наши потомки через пятьдесят лет будут читать воспоминания о той учебной барщине, которую отбывали Менделеевы, Сеченовы, Столетовы и ныне здравствующие крупные русские учёные, чтобы только получить право производить свои учёные работы, чтобы оплатить возможность прославить Россию своими открытиями». Вся статья представляла страстный призыв П. Н. Лебедева в пользу создания специальных научно-исследовательских лабораторий. В другой статье, посвящённой Ломоносову, «Памяти первого русского учёного», он писал: «... если присмотреться к работе наших выдающихся учёных, то приходится утверждать, что в большинстве случаев они дали крупные исследования не благодаря тем условиям, в которых они работали в России, а вопреки им...» (стр. 361)<sup>1</sup>. Тяжёлая судьба самого Лебедева представляет наглядную иллюстрацию к его словам. Большой интерес в этом смысле представляют материалы, недавно опубликованные Т. П. Кравцом в сборнике «Научное наследство» (стр. 551)<sup>2</sup>. Материалам предпослано весьма содержательное введение, написанное Т. П. Кравцом; оно широко использовано нами в настоящей статье, так же как и биография П. Н. Лебедева, написанная П. П. Лазаревым<sup>3</sup>.

В 1904 г. П. Н. Лебедев, получив отказ в отпуске суммы, необходимой для покупки приборов, подаёт на имя попечителя Московского учебного округа прошение, в конце которого пишет: «Я считаю, что четыре года бесправного положения, в течение которого я не мог, не по своей вине, добиться возможности учить и работать при сколько-нибудь сносных условиях, а также опубликованные мною за это время научные исследования (по световому давлению) дают мне право рассчитывать на такое положение, которым пользуются и должны пользоваться штатные профессора университета» (стр. 617)<sup>2</sup>.

Несколько позднее, в письме Б. Б. Голицыну (1905 г.) П. Н. пишет: «...окружающая действительность — какой-то беспрерывный одуряющий кошмар, беспросветное отчаяние» (стр. 599)<sup>2</sup>. Однако вспышки отчаяния, вызванного окружающей обстановкой и болезнью, сменялись новым творческим подъёмом. Характерно одно из писем 1909 года, когда Лебедев работал над исследованием давления света на газы: «Право, я опять влюблён в свою науку, влюблён как мальчик, ну совсем как прежде: я сейчас так увлекаюсь, работаю целыми днями, точно я и больным не был — опять я такой же, каким был прежде: я чувствую свою психическую силу и свежесть, я играю трудностями, я чувствую, что я Сирано де Бержерак в физике...» (стр. 602)<sup>2</sup>.

Ранняя смерть Лебедева (46 лет) безусловно была связана с его уходом в 1911 г. из Московского университета. Уход был вызван протестом против полицейских мер министра просвещения Кассо. Уход означал разрушение созданной П. Н. Лебедевым лаборатории и переживался им необычайно тяжело. Ему пришлось без всякой поддержки государства, на общественные средства, с большими трудностями создавать новую лабораторию.

Тем большее уважение вызывает решительный отказ П. Н. Лебедева уехать работать за границу, куда его приглашал ряд иностранных научных учреждений. С. Аррениус писал ему: «Естественно, что для Нобелевского института было бы большой честью, если бы Вы пожелали там устроиться и работать, и мы, без сомнения, предоставили бы Вам все необходимые средства, чтобы Вы имели возможность дальше работать... Вы, разумеется, получили бы совершенно свободное положение, как это соответствует Вашему рангу в науке» (стр. 28)<sup>3</sup>.

С. И. Вавилов справедливо отмечает, что «П. Н. Лебедев стал пионером замечательного и для России совсем нового дела — большой коллективной исследовательской работы (стр. 247)<sup>4</sup>. Число учеников, работавших под непосредственным руководством П. Н. Лебедева, достигало одно время почти тридцати. О П. Н. Лебедеве, как руководителе и учителе, можно судить по его переписке. Особенно выразительна в этом смысле «Инструкция студенту Альтбергу» (стр. 572)<sup>2</sup>. В ней, наряду с совершенно конкретными техническими указаниями, касающимися отдельных деталей экспериментальной установки, имеется целый параграф, посвященный субъективным особенностям психологии Альтберга и носящий чисто воспитательный характер.

## 2. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ИСТОРИИ ПРОБЛЕМЫ

Существование светового давления вытекает с необходимостью и в очень наглядной форме из любой корпускулярной теории света, просто как результат бомбардировки освещаемого тела «световыми частицами». Наоборот, из волновых представлений далеко не так просто и наглядно можно прийти к необходимости существования светового давления. Этим и объясняется своеобразие истории вопроса о световом давлении.

До появления волновой теории света очень широко и часто пользовались световым давлением для объяснения различных явлений. В частности, ещё Кеплер в сочинении «De Cometis» (1619 г.) выдвинул гипотезу о «сдувании» световым давлением кометных хвостов в сторону, противоположную Солнцу. «Указание на причину, что из материи кометного тела нечто непрерывно изгоняется солнечными лучами, силою оных, подал мне хвост кометы, о коем известно, что он всегда удаляется в сторону, противоположную Солнцу, и лучами солнца формируется».

Эйлер также был уверен в том, что кометные хвосты образуются благодаря давлению световых лучей и, будучи сторонником волновой теории света, пытался, правда, в не очень подробной форме, обосновать из волновых представлений необходимость существования этого эффекта.

Иногда эти ссылки на световое давление носили анекдотический характер. П. Н. Лебедев в своей обзорной статье «Давление света» (стр. 381)<sup>1</sup> приводит выдержку из Гартзокера (1696 г.), который писал, что: «...путешественники утверждают, что течение вод Дуная значительно медленнее, когда лучи солнца противодействуют его движению (утром) и делается более быстрым после полудня, когда лучи солнца помогают его течению».

К этому мы можем еще добавить, что Сирано де Бержерак в философской утопии «Иной свет или государства и империи на Луне» (1659 г.) шутил: «Поэтому я говорю, что солнечные лучи и исходящее из них действие, ударяя по Земле, заставляют её вращаться, как мы заставляем вращаться шар, ударяя его рукой»<sup>2</sup>.

В XVIII веке Де Мейраном и Дюфеом делались первые неудачные попытки экспериментально обнаружить световое давление. П. Н. Лебедев очень высоко оценивал экспериментальное искусство (использование магнитного подвеса), а главное, силу критической мысли своих далёких предшественников. Получив на первый взгляд положительный эффект, они справедливо приписали этот эффект действию побочных причин, ничего общего не имеющих со световым давлением.

После победы в XIX столетии волновой теории света проблема светового давления потеряла на долгое время свою теоретическую базу. В этом смысле показательно, что даже один из основателей волновой теории — Френель — воздержался от высказывания каких-либо теоретических соображений по поводу существования давления света, хотя и потратил много труда на безуспешные попытки обнаружить световое давление на опыте (1825 г.)<sup>3</sup>.

Позднее Крукс<sup>4</sup>, исследуя более детально причины неудач Френеля, обнаружил новое явление, так называемый радиометрический эффект, вызванный взаимодействием окружающего газа с неравномерно нагретыми светом твёрдыми телами. Но обнаружить световое давление Крукс тоже не смог. Радиометрический эффект представляет основную помеху при исследовании светового давления.

Лишь в 1873 г. Максвелл, развивая уже электромагнитную теорию света, обосновал теоретически (и то не совсем строго) необходимость существования светового давления. В § 792 «Трактата об электричестве и магнетизме» было сказано: «Величина  $p \left( \frac{E^2}{8\pi} = \frac{M^2}{8\pi} \right)$  представляет собой числовое значение половины всей энергии в единице объёма, которая находится в нём, как энергия электрической поляризации и как энергия магнитной

поляризации среды. Вследствие существования магнитной энергии в направлении магнитных сил возникает натяжение, величина которого равна  $p$ , а в направлении, перпендикулярном к ним, — давление, имеющее ту же величину  $p$ .

Совместное действие электрической и магнитной поляризации выражается в форме давления, действующего в направлении распространения волны; величина его равна  $2p$ . В свою очередь,  $2p$  представляет собою полную энергию луча в единице объёма, а поэтому в среде, в которой распространяются волны, в направлении их распространения возникают силы давления, которые в каждой точке пространства численно равны величине энергии в каждой единице объёма». П. Н. Лебедев так поясняет ход рассуждений Максвелла (стр. 386)<sup>1</sup>: «Чтобы объяснить, как возникает световое давление, Максвелл пользуется основным свойством силовых линий Фарадея: это свойство заключается в том, что в направлении действия этих сил поляризованная среда испытывает натяжение, а в плоскости, перпендикулярной к этому направлению, линии сил, отталкиваясь друг от друга и стремясь распространиться в среде, производят механическое давление друг на друга и на поверхности, ограничивающие среду».

Доводы Максвелла отнюдь не показали всем физикам убедительными. Строгий же вывод светового давления, основанный на максвелловской электродинамике, был дан гораздо позднее, в 1901 г., казанским физиком Д. А. Гольдгаммером<sup>8</sup>. Следует отметить ещё работу А. И. Садовского о пондеромоторном действии света, незаслуженно отвергнутую при докторской защите<sup>9</sup>.

Разработка термодинамики излучения также привела Бартоли в 1876 г.<sup>10</sup> к необходимости постулирования существования светового давления. Отсутствие светового давления позволило бы нарушить второе начало термодинамики, перенося тепло от более холодного тела к более тёплому при помощи излучения. Особенную отчётливость термодинамическим рассуждениям придавал в 1884 г. Больцман, использовавший гипотезу о существовании светового давления для теоретического вывода известного закона Стефана-Больцмана<sup>11</sup>. В этой же работе Больцман, очевидно, впервые обратил внимание на расхождение величин светового давления, подсчитываемых из корпускулярных и из волновых представлений. Как известно, корпускулярная точка зрения, пользующаяся ньютоновской механикой для «световых частиц», приводит к значению светового давления, в два раза большему, чем волновая теория. Термодинамические соображения не давали величины давления и, несмотря на их общность, также не являлись для всех убедительными. Вызывала сомнения сама правомерность применения термодинамики к такому объекту, как излучение. Следует помнить, что в те годы термодинамика излучения ещё только создавалась.

В 1874 Цёльнер<sup>12</sup> и в 1876 г. Бартоли предприняли новые, но опять неудачные попытки экспериментально обнаружить световое давление. Мешали радиометрические силы. Такова была ситуация, когда в 1890 г. молодой П. Н. Лебедев впервые заинтересовался проблемой светового давления.

### 3. ПРИЧИНЫ, ПРИВЛЕКШИЕ ВНИМАНИЕ П. Н. ЛЕБЕДЕВА К ПРОБЛЕМЕ СВЕТОВОГО ДАВЛЕНИЯ

Весьма примечательны причины, привлёкшие внимание П. Н. Лебедева к проблеме светового давления. Подход к этой проблеме характерен для всего облика П. Н. Лебедева, как учёного.

В одном из писем того периода П. Н. Лебедев пишет: «Я, кажется, сделал очень важное открытие в теории движения светил, специально комет... Найденный закон распространяется на все небесные тела. Сообщил Винуеру, сперва он объявил, что я с ума сошёл, а на другой день, поняв в чем дело, очень поздравлял. Сперва я был в сильном нервном напряжении, но теперь, когда закон доказан, я ничуть не волнуюсь, частью, может быть, оттого, — этого я не скрою — что озадачен, даже ошеломлён его общностью, которую сначала не предчувствовал. Выведенный мною закон не есть дело минутного наития: около двух лет ношу я его зачатки. Вопрос, которым я занят издавна, я люблю всей моей душой так, как я себе представляю, родители любят своих детей» (стр. 17)<sup>3</sup>.

Речь идёт об отталкивательной силе лучеиспускающих тел. Под таким названием в 1891 г. П. Н. Лебедев опубликовал в Трудах Отделения физических наук Общества любителей естествознания<sup>13</sup> свою первую, пока чисто теоретическую работу, посвящённую световому давлению.

В этой работе П. Н. Лебедев проводит очень интересное сопоставление ньютоновской силы притяжения с силой отталкивания, вызванной лучеиспусканием и действующей между двумя шаровидными телами. Причиной отталкивания является давление излучения, испускаемого одним телом на поверхность другого тела. Воображение П. Н. Лебедева поразила универсальность этой силы отталкивания, всегда конкурирующей с ньютоновским притяжением. Действительно, между всеми телами с температурой, отличной от абсолютного нуля, имеет место сила лучистого отталкивания.

Сила лучистого отталкивания так же зависит от расстояния, как и ньютоновское притяжение. Впервые в истории, количественно анализируя вопрос о кометных хвостах, П. Н. Лебедев чётко высказывается за световое давление, как основной фактор, и против гипотезы об электростатическом отталкивании солнцем кометных частиц.

Вместе с тем П. Н. Лебедев указывает, что вопрос о давлении на отдельные молекулы, входящие в состав кометных хвостов,



гораздо сложнее вопроса о давлении света на макроскопические тела. Для макроскопических тел, значительно превышающих по своим размерам длину световой волны, П. Н. Лебедев вывел следующую простую формулу для относительной величины разности сил притяжения и отталкивания: разность отнесена к величине ньютоновского притяжения (стр. 65)<sup>13</sup>

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

Формула выведена для абсолютно чёрных тел при 0°С;  $r$  и  $R$  — радиусы тел,  $\delta$  и  $\Delta$  — плотности тел. С уменьшением размеров растёт роль светового давления, что вполне естественно, поскольку ньютоновское притяжение — объёмный, а световое давление — поверхностный эффект.

Лебедевская формула приводит к выводу, который и сейчас может вызвать удивление. Оказывается, сила лучистого отталкивания между двумя телами размером примерно с яблоко ( $r = R \cong \cong 4$  см;  $\delta = \Delta \cong 1$ ) уже превалирует над силой ньютоновского тяготения. Это плохо согласуется с нашими привычными представлениями об огромности сил тяготения и малости сил светового давления. Всё дело, конечно, заключается в величине масс, вызывающих ньютоновское притяжение. Ниже мы увидим, что современная астрономия считает световое давление весьма серьёзным фактором.

В конце статьи П. Н. Лебедев обращает внимание на то, что лучистое взаимодействие должно учитываться при анализе межмолекулярных сил. Он пишет при этом: «Взаимодействие молекул можно рассматривать, как более сложный случай, как действие резонаторов друг на друга» (стр. 65)<sup>13</sup>.

Таким образом был поставлен ряд проблем огромного диапазона — от небесной механики до физики межмолекулярных сил. Мы видели, что световое давление было в центре внимания крупнейших физиков того времени, как следствие электродинамики Максвелла и как необходимый элемент термодинамики излучения. Но для П. Н. Лебедева световое давление было большим, оно было существенным фактором всего мироздания, и мы увидим ниже, что П. Н. Лебедев был прав.

Вот это и определило основное направление всей научной деятельности П. Н. Лебедева. Доказательство существования светового давления стало основным делом его жизни.

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОНДЕРОМОТОРНОГО ДЕЙСТВИЯ ВОЛН НА РЕЗОНАТОРЫ

В своём дневнике 4 января 1891 г. П. Н. Лебедев излагает план работ о силах волнового давления (стр. 19)<sup>3</sup>.

Намечая этот план, он рассматривал световое давление как частный случай волнового давления вообще и как частный случай

взаимодействия резонаторов между собой и поэтому решил начать с исследования этого взаимодействия. Организовав лабораторию в Московском университете, П. Н. Лебедев сразу же приступил к реализации своего плана. Он выполнил серию работ под общим названием «Экспериментальное исследование пондеромоторного действия волн на резонаторы» (стр. 84)<sup>3</sup>. В первой работе, опубликованной в 1894 г., исследовались электромагнитные резонаторы, во второй — 1896 г. — гидродинамические резонаторы, и, наконец, в третьей — 1897 г. — акустические резонаторы. П. Н. Лебедев очень интересно аргументирует необходимость исследования всех трёх указанных типов резонаторов: «...перенося исследование 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» (стр. 88)<sup>3</sup>. П. Н. Лебедева не смутила неудача такого известного экспериментатора, каким был Бойс, незадолго до этого безуспешно пытавшегося обнаружить пондеромоторные силы между двумя электромагнитными резонаторами.

Основные трудности заключались, по признанию П. Н. Лебедева, «в приёмах возбуждения правильных и достаточно сильных колебаний, ... в измерении длин волн резонаторов ... в выработке 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» (стр. 91)<sup>3</sup>. Мы не можем здесь вдаваться в подробности, но всё же следует отметить исключительное экспериментаторское искусство, проявленное П. Н. Лебедевым в этой серии работ. Достаточно указать на выбор формы возбудителя электромагнитных колебаний, устраняющей электростатическое действие (стр. 93, рис. 10)<sup>3</sup>, введение компенсирующего тела в опытах с колеблющимися шариками (стр. 117)<sup>3</sup> и т. д.

При опытах П. Н. Лебедева с электромагнитными и гидродинамическими резонаторами расстояния между вибраторами и резонаторами были значительно меньше длины волны. Например, при электромагнитных опытах длина волны была равна 350 см, а расстояние между вибратором и резонатором всего несколько сантиметров. Поэтому П. Н. Лебедев получил закономерности, характерные для взаимодействия близко расположенных осцилляторов. При изменении частоты вибратора сила, действующая на резонатор, имеет ход, изображённый на рис. 1 (стр. 120)<sup>3</sup>.

«Когда резонатор выше настроен, то наблюдается притяжение; когда он настроен ниже, то отталкивание. Наибольшие величины

этих противоположных пондеромоторных сил имеют место в непосредственной близости резонанса и непрерывно переходят друг в друга» (стр. 121)<sup>8</sup>.

Правда, для электромагнитных резонаторов не удалось непосредственно наблюдать случай полного резонанса — проводники контуров так нагревались, что конвекционные токи воздуха мешали проводить измерения, но весь остальной ход кривых совпадал для резонаторов обоих типов.

При опытах с акустическими резонаторами П. Н. Лебедеву удалось увеличить расстояние между источником и приёмником колебаний до величины, несколько превышающей длину волны. При близких расстояниях результаты получились такие же, что и в предыдущих двух работах. Для больших расстояний получился новый результат, изображённый на рис. 2. Между источником и приёмником действуют только силы отталкивания, дости-

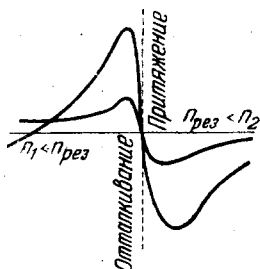


Рис. 1.

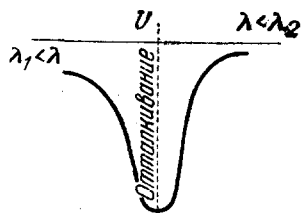


Рис. 2.

гающие максимальной величины при полном резонансе. Интересно отметить, что П. Н. Лебедев был сначала даже несколько озадачен этим результатом, но затем узнал в нём аналога давно указанному им самим отталкиванию лучеиспускающих тел. Это послужило толчком к вычислению П. Н. Лебедевым силы давления со стороны плоской электромагнитной волны на осциллятор, что, в свою очередь, сыграло большую роль в подготовке опытов по давлению света на газы (см. ниже).

За работу по взаимодействию резонаторов П. Н. Лебедев получил русскую степень доктора без предварительной сдачи магистерского экзамена и без представления магистерской диссертации. Надо сказать, что в то время русскую докторскую степень имели считанные учёные (не следует смешивать эту степень с докторской степенью, сравнительно легко защищавшейся при иностранных университетах, которую П. Н. Лебедев получил в начале своей научной карьеры).

## 5. ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕТОВОГО ДАВЛЕНИЯ НА ТВЁРДЫЕ ТЕЛА

После окончания исследования взаимодействия резонаторов в 1898 г. П. Н. Лебедев приступил к своей основной работе по доказательству существования сил светового давления. Он был во всеоружии экспериментального опыта, накопленного при выполнении предыдущих исследований, но и задача была достаточно трудна. Об этом свидетельствовали неудачи предшественников.

Основная трудность, конечно, заключалась в малой величине ожидаемого эффекта. При падении по нормали пучка параллельных лучей на плоскую поверхность световое давление должно определяться следующей формулой:

$$p = \frac{E}{c} (1 + \rho), \quad (1)$$

где  $E$  — энергия, падающая в одну секунду на  $1 \text{ см}^2$ , а  $\rho$  — коэффициент отражения поверхности. По вычислениям Максвелла и Бартоли давление солнечных лучей должно было лежать в пределах от  $4 \cdot 10^{-8}$  грамма на  $1 \text{ см}^2$  для чёрной — до  $8 \cdot 10^{-8}$  грамма на  $1 \text{ см}^2$  для идеально отражающей поверхности.

Максвелл в своём трактате (§ 793) наметил возможный способ обнаружения светового давления. Этот способ внешне прост, но таит в себе большие трудности: «Сконцентрированный электрический свет будет производить, вероятно, ещё большее давление (чем солнечный свет) и нет ничего невозможного в том, что лучи такого света, падая на тонкую металлическую пластинку, легко подвешенную в пустоте, будут оказывать на эту пластинку заметное механическое действие».

П. Н. Лебедев пишет: «Когда я приступил к своим опытам, я полагал, что расположение, указанное Максвеллом, не приводит к цели, так как на этом пути уже потерпел неудачу Цёлнер, он же обратил внимание на то обстоятельство, что теоретически предсказанная Максвеллом числовая величина (светового давления) приблизительно в 100 000 раз (более поздний и правильный расчёт даёт 10 000 *В. Ф.*) менее той, которую наблюдал в одном частном случае Крукс (радиометрический эффект). Если и можно было надеяться уменьшить в очень значительной мере эти побочные радиометрические силы, то всё же, казалось мне, решающее значение может иметь только такой опыт, в котором удастся каким-либо образом компенсировать действие этих сил» (стр. 154)<sup>3</sup>.

П. Н. Лебедев решил воспользоваться тем обстоятельством, что радиометрические силы есть внутренние силы радиометра и поэтому не должны вызывать движения радиометра в целом. Сделав миниатюрный радиометр из слюды с расположенным внутри него и жёстко с ним скреплённым крылышком, он подвесил этот радиометр на тонкой нити в стеклянном баллоне, из которого

был выкачан воздух. При освещении крылышка светом дуговой лампы наблюдались отклонения, по порядку величины совпадающие с теми, которые должно было вызвать световое давление. Результаты этих предварительных опытов были доложены П. Н. Лебедевым 17 мая 1899 г.

Однако уже при предварительных опытах П. Н. Лебедев убедился в том, что радиометрические силы могут быть сделаны весьма небольшими и что «Вызываемое ими возмущение оказывается даже меньше того возмущения, которое обуславливается конвекцией» (стр. 156)<sup>3</sup>.

Поэтому после двухлетнего изучения радиометрических сил он вернулся к более простому и вместе с тем и более убедительному методу обнаружения светового давления. П. Н. Лебедев понимал, что цель его опытов в первую очередь состоит в убедительном доказательстве самого факта существования светового давления и поэтому обращал основное внимание на доказательность в этом смысле экспериментального метода. Он указывал: «Как ни просто максвелловское расположение опыта, оно встречает, однако, два существенных затруднения, обусловленных, с одной стороны конвективными токами, а с другой — радиометрическими силами. При самых высоких разрежениях эти побочные силы значительно уменьшаются, но и с ними всё-таки приходится считаться при измерениях светового давления» (стр. 156)<sup>3</sup>.

Конвекционные потоки возникали в результате нагрева прилегающих к крылышку слоёв газа. Этот нагрев вызывался, в свою очередь, нагреванием крылышка поглощённой лучистой энергией. Опасность восходящих конвекционных потоков заключалась в том, что даже и при небольшом наклоне плоскости крылышка по отношению к вертикали эти потоки уже оказывали на него дополнительное давление и вызывали заметное перемещение крылышка. Однако направление и величина этого перемещения зависели только от степени нагревания крылышка и газа и не зависели от направления падающих лучей. Вот это обстоятельство и было очень остроумно использовано П. Н. Лебедевым для исключения роли конвекции. Он просто заставил лучи попеременно падать то с одной, то с другой стороны крылышка.

Для уменьшения радиометрических сил достигалось максимально возможное разрежение в баллоне радиометра. Кроме того, крылышки были сделаны из тонкого металла с тем, чтобы уменьшить по возможности разность температур обеих поверхностей, являющуюся причиной возникновения радиометрических сил. Ясно, что тем тоньше крылышко, тем меньше эта разность температур. Для определения поправки на радиометрические силы П. Н. Лебедев применил очень простой и изящный приём, а именно: «...если мы будем одновременно наблюдать два

одинаковых крылышка, имеющие очень значительную разницу толщин, то мы можем вычислить, как велико было бы отклонение, вызываемое световым пучком, если бы толщина крылышка была равна нулю». П. Н. Лебедев отмечает, что вообще поправки на радиометрические силы пришлось делать только для платинированных крылышек: у крылышек с зеркальными поверхностями радиометрические силы были исчезающе малы, очевидно, вследствие малости поглощения крылышками энергии.

П. Н. Лебедев опасался ещё влияния некоторых гипотетических эффектов, связанных с распылением освещённых тел, но эти эффекты должны были бы сильно зависеть от длины волны падающего излучения и от материала крылышек, что позволило поставить соответствующие контрольные опыты.

Переходим к описанию деталей экспериментальной установки.

На рис. 3 изображена оптическая схема всей установки (стр. 158)<sup>3</sup>. Эта схема настолько соответствует поставленной задаче, что и сейчас, через 50 лет, вряд ли в неё можно внести существенные изменения.

Изображение кратера  $B$  тридцатиамперной дуги при помощи конденсора  $C$  фокусировалось на металлическую диафрагму  $D$  с отверстием  $d = 4$  мм. Выходящей из диафрагмы расходящийся пучок превращался при помощи линзы  $K$  в параллельный. Для поглощения инфракрасных лучей («ультракрасных» как их называет П. Н. Лебедев) за линзой находился стеклянный сосуд  $W$ , наполненный водой. Здесь же можно было помещать светофильтр, либо заменять чистой воду голубым аммиачным раствором медной соли. Расположенная далее система плоских зеркал  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5$  и  $S_6$  позволяла менять на  $180^\circ$  направление лучей, падающих на крылышко радиометра  $R$ . При расположении, изображённом на рис. 3, световой пучок после последовательных отражений от зеркал  $S_1, S_2$  и  $S_3$  фокусировался линзой  $L_1$  на

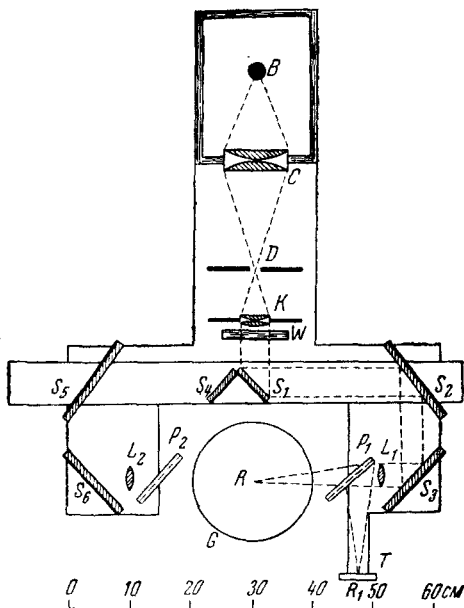


Рис. 3. Схема установки.

крылышко  $R$ , имея направление справа налево. При сдвиге двойного зеркала ( $S_1, S_4$ ) вправо световой пучок проходил путь  $S_4, S_5, S_6$  и фокусировался линзой  $L_2$ , имея уже направление слева направо. Напомним, что это изменение направления было необходимо для исключения влияния конвекции. Источник света был выбран П. Н. Лебедевым по тому времени наиболее рациональный и обладающий достаточной мощностью, но чувствуется, что много хлопот доставила нестабильность его режима горения. П. Н. Ле-

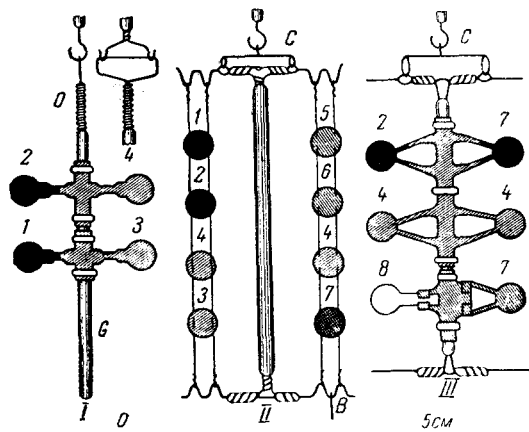


Рис. 4. Подвижная часть радиометра.

бедев указывает, что только применение углей наилучшей марки позволило провести наблюдения (стр. 168)<sup>3</sup>. Современный оптик, пожалуй, заменил бы дугу ртутной лампой сверхвысокого давления, но следует помнить, что ртутным лампам СВД нет ещё и 20 лет от роду. Для контроля яркости светового пучка П. Н. Лебедев ввёл на пути света тонкую стеклянную пластинку  $P_1$ , расположенную под углом в  $45^\circ$ . Отражённый этой пластинкой свет падал на термобатарею из пяти константан-железных спаев. Термомок измерялся гальванометром. Характерно, что уже в то время П. Н. Лебедев предпочёл воспользоваться методом объективной фотометрии. Для компенсации потерь в пластинке  $P_1$  на втором пути светового пучка за линзой  $L_2$  была установлена такая же пластинка  $P_2$ .

Не менее продуманно были выполнены три конструкции подвижных частей радиометра, изображённые на рис. 4. Здесь особенно изящна вторая конструкция, позволившая избежать заметного светового давления на части, поддерживающие крылышки.

Опыты были произведены со следующими крылышками.

#### Материал

|                                                                       |         |
|-----------------------------------------------------------------------|---------|
| 1. Платина, платинированная толстым слоем.                            |         |
| 2. Платина, платинированная в пять раз тоньше                         |         |
| 3. Платина металлическая (зеркальная поверхность), толщина . . . . .  | 0,10 мм |
| 4. Платина металлическая (зеркальная поверхность), толщина . . . . .  | 0,02 мм |
| 5. Алюминий металлический (зеркальная поверхность), толщина . . . . . | 0,10 мм |
| 6. Алюминий металлический (зеркальная поверхность), толщина . . . . . | 0,02 мм |
| 7. Никель металлический (зеркальная поверхность), толщина . . . . .   | 0,02 мм |
| 8. Слюда, толщина . . . . .                                           | 0,01 мм |

Под «платинированной платиной» понимается платина, покрытая платиновой чернью. Использование крылышек разной толщины, как мы уже указывали, позволило исключить действие радиометрической силы. Подвижная часть радиометра была подвешена на тонкой стеклянной нити, на которой было укреплено и зеркальце, служившее для отсчёта угла поворота всей системы. Использование зеркального отсчёта очень повысило чувствительность установки.

Наиболее трудным, при уровне экспериментальной техники того времени, конечно, было получение достаточно высокого вакуума. Для крепления нити к баллону пришлось применить шлиф с ртутной заливкой. Используемый П. Н. Лебедевым насос (форвакуумный по современной терминологии) давал даже с современной точки зрения хороший вакуум (менее  $10^{-4}$  мм рт. ст.). И сейчас получение такого вакуума без помощи диффузионных насосов считается свидетельством неплохого качества форвакуумного насоса.

Однако и этот вакуум был недостаточен для нужного ослабления конвекционных помех, главным образом именно конвекционных потоков, как указывает сам П. Н. Лебедев (стр. 179)<sup>3</sup>, а не радиометрических сил, как об этом обычно пишут, излагая лебедевские опыты.

Поразителен приём, применённый П. Н. Лебедевым для получения ещё большего разряжения (см. рис. 5): «... капля ртути  $Q$  была помещена на дно стеклянного баллона  $B$ , затем воздух разрежался насосом, и ртутная капля нагревалась в водяной бане  $K_1$  на  $5^\circ\text{C}$  выше комнатной температуры; испаряясь, ртуть перегоняется в насос и увлекает за собой остатки воздуха из баллона. Если отделить баллон от насоса и осушителя  $P$  при помощи барометрического запора  $V$ , то в баллоне останутся только ртутные пары: их давление уменьшится до весьма малой величины, если наполнить сосуды  $K_1$  и  $K_2$  охлаждающей смесью из



льда и соли» (стр. 164)<sup>3</sup>. Мы видим, что «играя трудностями», П. Н. Лебедев открыл и применил принцип действия диффузионных насосов — основу всей современной вакуумной техники. Это было сделано за много лет до официального изобретения диффузионных насосов.

Энергия падающего светового пучка измерялась при помощи calorиметра. Измерения показали, что освещённость крылышек была от двух до трёх раз больше освещённости солнечными лучами поверхности земли.

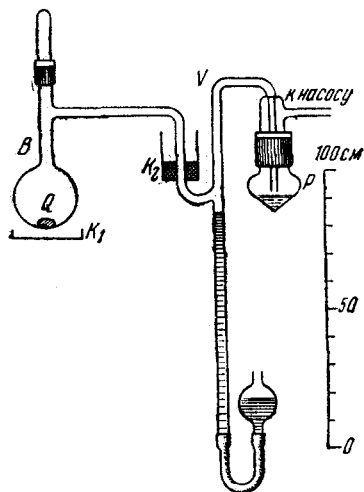


Рис. 5. Схема получения вакуума.

Прежде чем начать измерения П. Н. Лебедев тщательно проверил влияние возможных неточностей в юстировке всех элементов установки.

Сами эксперименты пришлось вести с помощником, следившим за горением дуги и передвигавшим зеркало  $S_1S_4$ . П. Н. Лебедев пишет: «Моим помощником в этих опытах был помощник препаратора при кабинете Автоном Фёдоров, его добросовестное отношение и ловкое обращение с приборами в значительной мере облегчили мне эти нелёгкие наблюдения».

В самом проведении наблюдений также сказалось экспериментальное искусство П. Н. Лебедева. Он не ждал успокоения системы с крылышками, а наоборот, наблюдал смещение положения равновесия при довольно больших колебаниях системы. При этом, очевидно, было использовано явление резонанса. П. Н. Лебедев указывает: «Замыкая освещение с периодическими перебивками, можно довести амплитуду колебаний прибора до нужной величины» (стр. 168)<sup>3</sup>. Смещения положения равновесия при изменении направления освещения составляли от 30 до 40 делений шкалы, что и представляло эффект светового давления. По поводу радиометрических сил П. Н. Лебедев пишет следующее: «... я многократно производил сравнительные измерения над тонкими и толстыми металлическими (зеркальными), платиновыми и алюминиевыми крылышками; мне, однако, не удалось обнаружить достаточно ясно выраженной радиометрической разницы; вот почему в пределах погрешностей наблюдений можно считать радиометрические силы тонких металлических крылышек равными нулю» (стр. 179)<sup>3</sup>. Таким образом, применение металлических

крылышек с большой теплопроводностью устранило основную причину неудач предыдущих исследователей.

Для определения величины силы светового давления из полученных смещений нужно было определить упругость нити подвеса. Это было сделано при помощи наблюдения колебаний тела с известным моментом инерции, подвешенного на той же нити. Для платинированного крылышка № 2 таким образом была получена величина, равная  $3,08 \cdot 10^{-6}$  дин. Для сопоставления с теорией П. Н. Лебедев произвёл калориметрические измерения энергии светового пучка и определил коэффициенты отражения крылышек, необходимые для использования формул. П. Н. Лебедев очень тщательно и строго оценивал точность своих измерений. Приводимая им величина общей ошибки  $\pm 20\%$  безусловно представляет верхний предел.

Характерна следующая деталь. П. Н. Лебедев пишет: «Когда я перешёл от наблюдений при комнатной температуре... к измерениям при охлаждении льдом с солью, я не ожидал получить такое согласие между наблюденными величинами и вычисленными по Максвеллу-Бартоли, которое вытекало из моих опытов; я поэтому предположил, что такое совпадение вычислений и наблюдений надо приписать случайности, и поэтому сперва заменил I калориметр II калориметром, а затем и II прибор с крылышками III-м прибором» (стр. 177)<sup>3</sup>. Далеко не всякий экспериментатор, получивший желанное совпадение теории с экспериментом, поступил бы так, как П. Н. Лебедев. Поэтому с особой убедительностью звучали выводы работы П. Н. Лебедева:

«1) Падающий пучок света производит давление как на поглощающие, так и на отражающие поверхности; эти пондеромоторные силы не связаны с уже известными вторичными конвекционными и радиометрическими силами, вызываемыми нагреванием.

2) Силы давления света прямо пропорциональны энергии падающего луча и не зависят от цвета.

3) Наблюденные силы давления света, в пределах погрешностей наблюдений, количественно равны максвелло-бартолиевым силам давления лучистой энергии» (стр. 179)<sup>3</sup>.

Поучительна история опубликования этой классической работы. Приведём некоторые свидетельства учеников П. Н. Лебедева. П. П. Лазарев в биографии П. Н. Лебедева пишет<sup>1</sup>:

«Измученный предшествовавшей педагогической работой и экзаменами («учебная барщина» В. Ф.) П. Н. в течение лета 1900 г. чувствовал себя настолько плохо, что не мог сам производить тех механических манипуляций, которые были связаны с исследованием, и при наблюдениях ему помогал служитель при физическом кабинете. Однажды во время опыта из-за случайного толчка при откатке тонкая нить с прибором, обнаруживающим давление, оборвалась, и прибор был испорчен; больному П. Н.

не представлялось возможным снова строить свой прибор, и он, хотя и не считал своё исследование вполне законченным в смысле точности, нашёл необходимым опубликовать его в том виде, в каком оно находилось в этот момент». Он опубликовал предварительное сообщение в Журнале русского физико-химического общества<sup>14</sup> и в августе 1900 г. сделал доклад на первом Интернациональном конгрессе физики в Париже. В этом предварительном сообщении уже содержались все основные результаты работы и, как пишет Т. П. Кравец (стр. 556)<sup>2</sup>: «Дата этого сообщения знаменует крутой поворот в научной жизни П. Н.: до него он был физиком, обращавшим на себя внимание; после него он стал знаменитым. Сам Лебедев, впрочем, не был удовлетворён своей работой и немедленно после конгресса принялся за приведение её в окончательный вид. Работал он над ней с крайним напряжением и к лету 1901 г. привёл себя в состояние полного изнеможения». В 1901 г. в Журнале русского физико-химического общества было опубликовано полное изложение работы<sup>15</sup>.

В 1904 г. по инициативе комиссии, в состав которой входили такие крупные учёные, как А. М. Ляпунов, Б. Б. Голицын и А. А. Белопольский, Академия наук единогласно присудила П. Н. Лебедеву премию за то, что ему удалось «доказать блестящим образом на опыте несомненное существование светового давления» (стр. 615)<sup>2</sup>.

В решении академической комиссии отмечалось также большое значение исследований светового давления для астрономии. Любопытен размер премии — 2862 р. 60 к. Позднее Академия наук избрала П. Н. Лебедева своим членом-корреспондентом.

Из многочисленных восторженных откликов иностранных учёных приведём только два наиболее интересных — Кельвина и Пашена. Кельвин сказал К. А. Тимирязеву: «Вы, может быть, знаете, что я всю жизнь воевал с Максвеллом, не признавая его светового давления, и вот Ваш Лебедев заставил меня сдаться перед его опытами» (стр. 244)<sup>4</sup>.

Ф. Пашен в письме П. Н. Лебедеву от 10 декабря 1900 г. (стр. 569)<sup>3</sup> писал: «Я считаю Ваш результат одним из важнейших достижений физики за последние годы. Я оцениваю трудности Ваших опытов тем более, что я сам несколько времени тому назад задался целью доказать световое давление и проделывал подобные же опыты, которые, однако, не дали положительного результата, потому что я не сумел исключить радиометрических действий. Ваш искусный приём, заключающийся в том, чтобы бросать свет на металлические диски, является ключом к разрешению вопроса».

В многочисленных работах, повторявших опыты П. Н. Лебедева по давлению света на твёрдые тела, содержится мало принци-

пиально новых результатов, и мы на них не будем останавливаться. Необходимо, однако, сказать несколько слов по поводу работы Никольса и Хэлла. Первое сообщение об этой работе появилось в 1901 г. через год после первого сообщения П. Н. Лебедева. Никольс и Хэлл применили принципиально иной метод исключения радиометрических сил, чем П. Н. Лебедев. Они работали при сравнительно больших давлениях газа (12 мм рт. ст.) и со стеклянными крылышками, обладавшими плохой теплопроводностью. При этом использовалось то обстоятельство, что радиометрический эффект при определённом давлении меняет знак, проходя через нуль. В литературе, иногда даже и в русской, указывалось, что Никольс и Хэлл, хотя и позднее П. Н. Лебедева, но получили тот же результат, что и он. Это совершенно не верно, ибо опыты Никольса и Хэлла ни в коей мере не обладали доказательной силой опытов П. Н. Лебедева.

Сам П. Н. Лебедев так оценивал результаты Никольса и Хэлла: «Никольс и Гулль должны основываться на гипотезе, что и при тех кратковременных освещениях, которыми они пользовались, имеет место то же равновесие радиометрических эффектов, которое наблюдается при стационарном освещении».

«Мне кажется, что было бы правильнее воспользоваться работой Никольса и Гулля для обратного заключения, а именно, допуская существование светового давления, утверждать, что открытый Круксом любопытный переход радиометрических явлений через нуль при определённых давлениях не зависит от продолжительности освещения» (стр. 394)<sup>1</sup>. Т. П. Кравец приводит мнение Герлаха, целиком подтверждающего оценку П. Н. Лебедева: «Он (Герлах) полагает, что единственное, что можно сказать об опытах Никольса, это, что они не противоречат нашему независимому от них убеждению, что световое давление существует в действительности» (стр. 558)<sup>2</sup>. Необходимо подчеркнуть, что это сказано крупным физиком, повторившим во всеоружии современной экспериментальной техники опыты П. Н. Лебедева. Поэтому совершенно не соответствует истине попытка Вуда преувеличить значение опытов Никольса и Хэлла<sup>16</sup>.

После завершения работы по давлению света на твёрдые тела П. Н. Лебедев поручает своим ученикам исследование давления звуковых волн и волн на поверхности жидкости. Существенно отметить, что эти экспериментальные работы, давшие весьма ценные результаты, опережали соответствующую теорию. Как это ни странно, теория давления более простых по своему механизму волн отставала от теории более сложных электромагнитных волн. Наконец, совсем удивительно то, что до самого

последнего времени существовала известная путаница в этих вопросах. Например, не всегда было ясно, какое давление измеряется при опытах с ультразвуковыми волнами («релеевское» или «ланжевеновское») <sup>17</sup>.

П. Н. Лебедеву всегда была ясна общность явлений волнового давления. В своём письме Н. П. Кастирину 30 января 1902 г. он пишет (стр. 592)<sup>2</sup>: «Меня давно свербит один большой вопрос... опыты с пондеромоторными силами самых разнообразных по своей физической природе волн, их действия на резонаторы и стенки всегда сводятся к энергии, к скорости распространения волны и в случае резонаторов ещё к отношению колебаний. В окончательных формулах входят только эти величины, значит только они необходимы и на протяжении всего рассуждения, а мы световое давление выводим двумя путями (и мне путь Бартоли кажется гораздо более естественным по существу, чем электромагнитный, в чём я страшно расхожусь с Н. Н. Шиллером) и звуковое — третьим, а гидродинамическое — четвёртым и т. д.». Таким более общим подходом в известной мере является использование понятия импульса волны и закона сохранения импульса. Этот подход обогатил физическое содержание вектора Умова-Пойнтинга и для электромагнитных волн связан с фундаментальной проблемой инертной массы. Импульсный подход одновременно сближает волновое рассмотрение с корпускулярным (конечно, уже в рамках фотонных представлений).

## 6. ОПЫТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДАВЛЕНИЯ СВЕТА НА ГАЗЫ

Если в опытах по давлению на твёрдые тела П. Н. Лебедев опирался на чёткие, хотя и не общепризнанные предсказания теоретиков, то в вопросе о давлении света на газы ситуация была обратной. Шварцшильд<sup>18</sup>, используя теорию дифракции, пришёл к выводу, что эффект давления света на свободные молекулы газа должен быть исчезающе мал.

Мы уже указывали выше, что для П. Н. Лебедева с самого начала была ясна (особенно после работы с акустическими резонаторами) необходимость учёта явления резонанса при рассмотрении давления света на отдельные молекулы. Учёт резонанса приводит к колоссальному увеличению эффективного сечения молекулы. Идея П. Н. Лебедева была, с соответствующей ссылкой, подробно развита в работе Дебая<sup>19</sup>, появившейся значительно позднее. Напомним, что эффективное сечение квазиупругого осциллятора, малого по сравнению с длиной волны, уже не зависит от истинных размеров осциллятора и порядка квадрата длины волны. При длине световой волны  $10^{-5} - 10^{-4}$  см это составляет  $10^{-10} - 10^{-8}$  см<sup>2</sup>, что на шесть-восемь порядков превышает газокINETическое сечение молекулы  $10^{-16}$  см<sup>2</sup>. Как известно, для

строого количественного расчёта сечения необходимо знание силы осциллятора и формы спектральной линии.

Для слоя газа в целом П. Н. Лебедев исходил из совершенно правильного соотношения:

$$p = \frac{\alpha E}{c}, \quad (2)$$

где  $p$  — световое давление,  $\alpha$  — коэффициент поглощения газового слоя,  $E$  — лучистая энергия, падающая в одну секунду на  $1 \text{ см}^2$ . Это соотношение проще всего вытекает из закона сохранения импульса и не связано ни с какими гипотезами о механизме взаимодействия световой волны с молекулами газа. Например, не существенно, имеет ли место истинное поглощение или только рассеяние света (благодаря отсутствию результирующего импульса у вторичных волн).

Судя по записи в дневнике за 1894 г. П. Н. Лебедев первоначально предполагал воспользоваться газами и парами, обладающими полосами поглощения в видимой части спектра —  $\text{NO}_2$ , J, Vg и Cl. Однако в окончательном варианте работы он перешёл к газам поглощающим инфракрасные лучи, — метан, пропан, бутан, этилен, ацетилен и углекислота. Очевидно причиной такого выбора явилось более удачное в этом случае сочетание оптических характеристик источника света и поглощающего газа и, кроме того, удобство в работе. А. К. Тимирязев указывает, что П. Н. Лебедев потратил около десяти лет на работу по световому давлению на газы. «Много раз он вынужден был бросать работу, так как не мог придумать средств для преодоления стоящих на пути трудностей»<sup>20</sup>.

Сам П. Н. Лебедев пишет, что «настоящая работа заняла более трёх лет времени» (стр. 200)<sup>3</sup>, но подразумевает при этом, очевидно, только последнюю, завершающую стадию работы.

Опубликованная в 1910 г. в Журнале русского физико-химического общества статья П. Н. Лебедева «Опытное исследование давления света на газы»<sup>21</sup> читается как увлекательная повесть о совершенно изумительной борьбе экспериментатора с неимоверными трудностями исследования. Этому способствует старая, хорошая манера изложения, при которой автор не подаёт готовый результат в «прилизанном» виде, а обстоятельно знакомит читателя со всеми трудностями и оп сностями, встретившимися на его пути. При такой манере изложения всегда можно оценить надёжность результатов, полученных в работе. При современном телеграфном стиле изложения всё это остаётся на совести автора.

Вот как описывает П. Н. Лебедев основной принцип выбранного им метода: «... лучи света, производя давление на отдельные молекулы, должны заставлять всю массу газа двигаться в направлении распространения света. Так как коэффициенты поглощения у газов очень незначительны, то и силы, с которыми

свет двигает газ, очень малы и даже при наиболее выгодных условиях опыта едва достигают сотой доли того давления, которое тот же пучок света производил бы на чёрную поверхность. Чтобы иметь возможность измерять эти малые силы, опыт располагался таким образом, что газ свободно мог перемещаться в направлении пронизывающих его лучей и производил давление на очень чувствительный поршневой аппарат» (стр. 197)<sup>3</sup>.

После построения и испытания более двадцати различных конструкций П. Н. Лебедев остановился на приборе, изображённом на рис. 6. Внизу рисунка изображён разрез

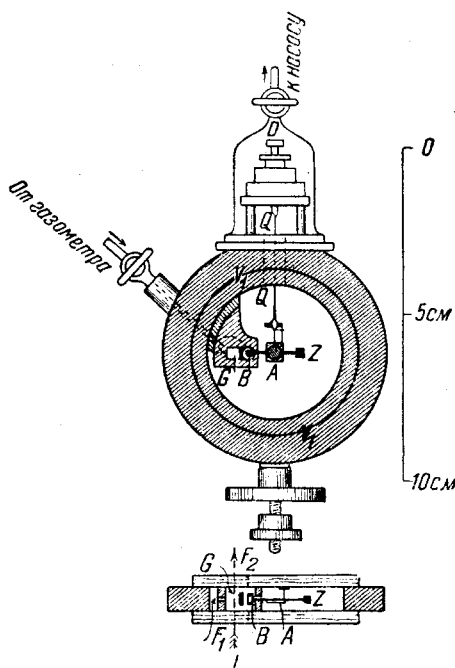


Рис. 6. Прибор для исследования давления света на газы.

прибора горизонтальной плоскостью, в которой лежал световой пучок. Остроумие схемы этого прибора состоит в том, что световой пучок пронизывает объём  $G$ , наполненный газом, не действуя непосредственно на лёгкий поршень  $B$ , вынесенный в соседний неосвещённый канал. Непосредственное давление светового пучка на поршень, согласно сказанному выше, превышало бы на несколько порядков величин искомое давление на газ. Давление света вызывает движения газа в направлении, указанном стрелкой, и возникает разность давления между окнами  $F_1$  и  $F_2$ . Возникшая разность давлений газа стремится выравняться через неосвещённый канал и приводит в движение поршень  $B$ . Поршень  $B$  с противо-

весом  $Z$  укреплен на коромысле чувствительных крутильных весов, подвешенных на кварцевой нити  $Q$ . На этой же нити укреплено зеркальце  $A$  для отсчёта углов поворота. Одно деление шкалы соответствовало разности давлений, равной  $1,4 \cdot 10^{-6}$  дин/см<sup>2</sup>, т. е.  $10^{-9}$  г/см<sup>2</sup>. Поршень миниатюрных размеров был изготовлен из лёгкого сплава магния (вес менее 0,03 г), причём для устранения притяжения, вызванного контактной разностью потенциалов, пришлось канал просверлить в муфте из такого же материала.

На рис. 7 изображена оптическая схема установки. Источником света служил штифт Нернста. От дуги пришлось отказаться ввиду нестабильности, хотя это и было связано с уменьшением примерно в 10 раз наблюдаемых эффектов. Свет от штифта  $N$  фокусировался зеркалом (светосильным)  $S$  с наружным серебрением на диафрагму  $O$ . Перед диафрагмой помещался тонкий кусок флуорита  $F$ , поглощавший длинные инфракрасные лучи, что было существенно, ибо предотвращало поглощение этих лучей в флуоритовых окнах  $F_1$  и  $F_2$  самого прибора и тем самым устраняло их очень опасное нагревание.

После диафрагмы  $O$  помещалась двойная посеребренная призма  $P_1P_2$  с плавным пневматическим управлением. По желанию можно было направлять световой пучок либо на зеркало  $S_1$ , либо на зеркало  $S_2$ , меняя направление прохождения лучей сквозь газ на  $180^\circ$ . Зеркала  $S_1$  и  $S_2$  (обладавшие довольно большой светосилой —  $1:4$ ) фокусировали изображение диафрагмы в газовом пространстве поршневого прибора.

Для получения нужной чувствительности пришлось отсчётную шкалу  $K$  отнести на огромное расстояние — 5,3 метра. Шкала наблю-

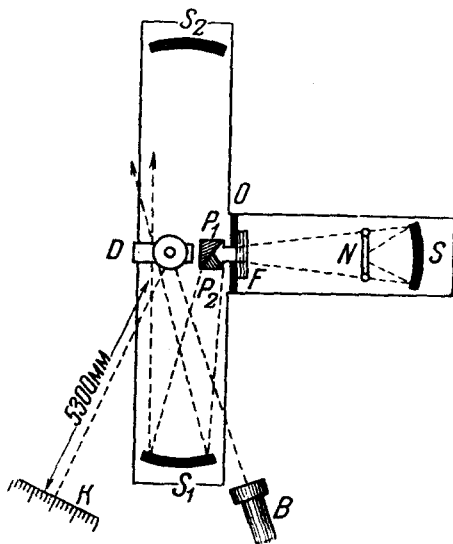


Рис. 7. Оптическая схема установки.

далась в трубу  $B$  с помощью зеркальца поршневого прибора. Даже при таком расстоянии наблюдаемые смещения не превышали двух делений шкалы, а в большинстве случаев составляли всего несколько десятых долей деления! Поэтому П. Н. Лебедеву пришлось обратить особое внимание на качество всей отсчётной системы, и он добился получения уверенных отсчётов с нужной степенью точности. При этом даже ползание нуля, этот бич экспериментаторов, был использован для устранения систематических ошибок. Поглощение света в слое газа определялось при помощи двух термоэлементов. Здесь также возникли огромные трудности, связанные с очень малыми величинами коэффициентов поглощения порядка нескольких десятых долей процента. Даже и сейчас определение поглощения, составляющего десятые доли процента, считается оптиками очень тяжёлой задачей.



Но, конечно, самой трудной была борьба с конвекционными потоками в объёме газа. Потоки вызывались неравномерным поглощением излучения и связанным с этим неравномерным нагревом газа. Прежде всего передние слои газа служили своеобразным светофильтром для более далёких слоёв, затем пучок света, пронизывающий газ, приходилось делать сходящимся для выигрыша в интенсивности.

Очевидно, что при строго горизонтальном расположении аппаратуры все эти эффекты не могли бы вызвать смещения поршня,

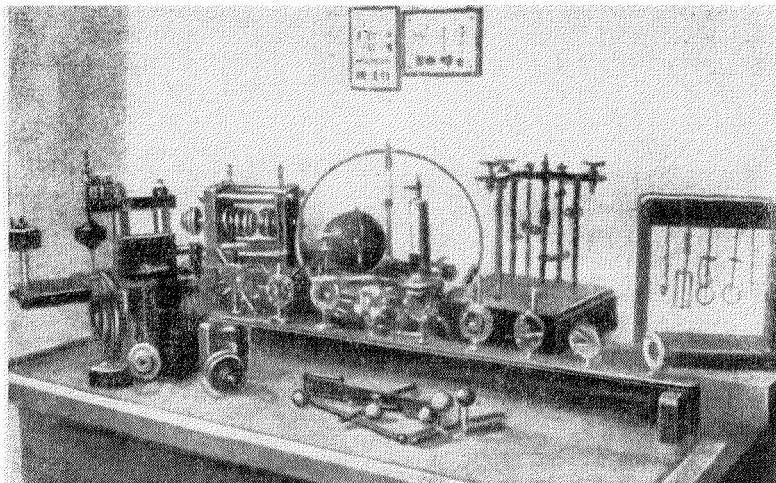


Рис. 8. Установка Лебедева по измерению светового давления на газы.

но практически всегда мог существовать небольшой наклон оси канала.

Здесь на помощь пришли экспериментальное чутьё и наблюдательность П. Н. Лебедева. Ещё при проведении предварительных опытов он заметил, что обычный светильный газ даёт более устойчивые результаты, чем более чистые ацетилен и углекислый газ. У П. Н. Лебедева возникла мысль, что это объясняется лучшей теплопроводностью светильного газа, вызванной примесью водорода. Повышение теплопроводности приводит к выравниванию температур и к ослаблению конвекционных потоков. После этого П. Н. Лебедев уже намеренно добавил водород по всем исследуемым газам. Он пишет (стр. 207)<sup>3</sup>: «Только этот приём позволил смерить силы светового давления, действующие на газ, с надлежащей уверенностью». Но и при добавлении водорода

пришлось проявить виртуозное искусство для правильной юстировки прибора, устраняющей роль конвекционных потоков. П. Н. Лебедев искусственно вызвал при помощи вставлявшейся чёрной алюминиевой решётки неравномерный нагрев воздуха, не поглощающего излучение, и добивался такой установки прибора, когда нагрев освещением решётки не вызывал никакого смещения поршня. В дальнейшем он нашёл несколько более простой способ установки, но основанный на гипотезе о справедливости формулы (2). Для получения каждой экспериментальной точки делался 31 отсчёт с интервалами в 30 секунд и при изменении направления лучей. Как и в первой работе были проведены специальные измерения для абсолютной градуировки прибора и для определения энергии падающих лучей  $E$ .

Из сводной таблицы результатов измерений видно, что для метана, этилена, ацетилена и углекислоты (смешанных с водородом) при изменении направления освещения совершенно устойчиво наблюдались усреднённые смещения шкалы, лежавшие в пределах от 0,55 до 0,85 деления с разбросом  $\pm 0,05 - 0,07$  деления. Коэффициенты поглощения составляли при этом 0,55 — 0,72 процента. По просьбе П. Н. Лебедева Н. Д. Зелинский приготовил для него пропан и бутан. Эти газы обладали «сильным» поглощением, составлявшим примерно два процента. Соответственно смещения шкалы возросли примерно до двух делений. Такие «большие» смещения П. Н. Лебедев мог измерять с высокой точностью. Согласие теоретически вычисленных по формуле (2) значений давления с экспериментально измеренными оказалось вполне удовлетворительным. Любопытно отметить при этом, что лучшее согласие наблюдалось в общем у слабо поглощающих газов.

П. Н. Лебедев с полным основанием заключает свою работу следующими выводами:

«1) Существование давления света на газы установлено опытным путём.

2) Величины этого давления прямо пропорциональны энергии пучка света и коэффициенту поглощения газа.

3) В пределах ошибок, наблюдений и вычислений соотношение (2) количественно удовлетворяет наблюдениям.

Таким образом, гипотеза о давлении света на газы, триста лет тому назад высказанная Кеплером, получила в настоящее время как теоретическое, так и экспериментальное обоснование».

Мы уже говорили в начале статьи, что до сих пор никто не решился повторить эти опыты П. Н. Лебедева.

Глядя глазами современного оптика на эту задачу, можно сказать, что сейчас есть возможность более выгодного сочетания оптических характеристик источника излучения и поглощающего

газа. П. Н. Лебедев был вынужден пользоваться источником с непрерывным спектром, сейчас можно было бы использовать резонансную лампу. Например, взяв ртутную лампу низкого давления, можно было бы освещать ею пары ртути. Поглощение излучения при этом можно сделать близким к полному, т. е. примерно на два порядка большим, чем это было в опытах П. Н. Лебедева. Но отсюда отнюдь не следует, что решение задачи стало лёгким. Во-первых, резонансные лампы обладают малой поверхностью яркостью, делающей их мало пригодными для использования в оптических системах. Во-вторых, устранение роли конвекционных потоков в таких условиях явится, вероятно, ещё более трудным, чем это было в опытах П. Н. Лебедева.

Независимо от развития техники физического эксперимента, работа П. Н. Лебедева будет всегда образцом экспериментального искусства.

Шварцшильд был вынужден в письме к П. Н. Лебедеву от 9 февраля 1910 г. написать: «Я хорошо помню, с каким сомнением я услышал в 1902 г. о Вашем предположении измерить давление света на газ, и я преисполнен тем бóльшим удивлением, когда прочёл, как вы устранили все препятствия» (стр. 26)<sup>3</sup>. В. Вин в письме к В. А. Михельсону писал, что Лебедев «владел искусством экспериментирования в такой мере, как едва ли кто другой в наше время». Английский королевский институт выбрал П. Н. Лебедева почётным членом за работу по световому давлению на газы. Наконец, Г. Лоренц в своём письме к жене П. Н. Лебедева (от 1 мая 1912 г.) по поводу его смерти писал: «Я считал его одним из первых и лучших физиков нашего времени и восхищался тем, как он в последний год при самых неблагоприятных условиях сумел поддержать в целости основанную им Московскую школу и нашёл возможность продолжать общую работу» (стр. 606)<sup>2</sup>.

## 7. РОЛЬ СВЕТОВОГО ДАВЛЕНИЯ ВО ВСЕЛЕННОЙ

Проблема кометных хвостов, привлекавшая внимание П. Н. Лебедева к световому давлению, имеет свою длительную и сложную историю. Долгое время пользовалась признанием весьма своеобразная теория Ньютона. Вот как излагает эту теорию знаменитый русский астроном Ф. А. Бредихин в классическом сочинении «О хвостах комет»: «Ньютон принимает, что окружающий голову кометы эфир составляет около Солнца атмосферу с увеличивающейся к нему плотностью. Преломлёнными и отражёнными от ядра лучами эфир этот нагревается вокруг кометы, становится от этого легче и тяготеет к Солнцу менее, нежели остальной эфир, соседний с ним. Вследствие этого он начинает двигаться в сторону от Солнца и уносит с собою легчайшие частички кометы, подобно

тому как восходит в печной трубе разрежённый воздух и уносит с собой дым»<sup>22</sup>.

Последние годы конкурируют оптическая (давление света) и электрическая (электростатическое отталкивание) точки зрения. Для электрической теории необходимо снабдить Солнце гипотетическим электрическим зарядом. Для вычисления сил светового давления необходимо знание сил осцилляторов для молекул, входящих в состав кометных хвостов. Здесь до самого последнего времени имелась основательная путаница. Недавно удалось показать, что эти силы осцилляторов были сильно преуменьшены. Сейчас можно считать установленным, что силы светового давления играют весьма существенную роль в образовании кометных хвостов.

Велика также роль давления света на газы внутри звёзд. Согласно представлениям некоторых астрофизиков, даже предельный размер звёзд определяется силами светового давления. При образовании слишком большой звезды излучение её ядра, нагретого до очень высокой температуры, сбрасывает избыток вещества силами светового давления.

Любопытно одно обстоятельство, насколько нам известно не отмечавшееся в литературе.

Задача о функции распределения молекул, находящихся в световом луче, приводит к появлению в кинетическом уравнении новых членов. В самом деле, сила светового давления, действующая на молекулу, благодаря эффекту Допплера зависит от скорости движения молекулы. Эта зависимость будет очень сильной даже при непрерывном спектре источника света, так как передние слои газа быстро образуют узкие линии абсорбции. Зависимость силы от скорости делает теорему Лиувилля несправедливой, и в кинетическом уравнении появятся члены типа  $f \frac{\partial X}{\partial \xi}$ , где  $X$  — компонента силы, а  $\xi$  — компонента скорости.

За последние годы появились работы, указывающие на весьма большое значение давления света на макроскопические твёрдые тела. Конечно, шутка Сирано де Бержерака осталась шуткой, но оказалось, что в механике космической пыли для частиц с размерами вплоть до сантиметров надо учитывать действие светового давления.

В. Г. Фесенков в монографии «Метеорная материя в междупланетном пространстве» (стр. 101)<sup>23</sup> подробно разбирает один важный и вместе с тем парадоксальный эффект, вызванный давлением света. Световое давление солнечных лучей должно вызывать падение частиц определённых размеров на Солнце. Речь идёт о частицах с размерами от нескольких десятков микрон до сантиметров. Для таких частиц световое давление, направленное по радиусу-вектору от Солнца, пренебрежимо по сравнению с ньютоновским притяжением. Но если учесть вращение частицы вокруг

Солнца, нетрудно установить, что будет существовать тангенциальная составляющая светового давления, направленная навстречу движению частицы. Возникновение тангенциальной компоненты вызвано абберацией света в результате движения частицы по отношению к источнику света (Солнцу). Благодаря абберации

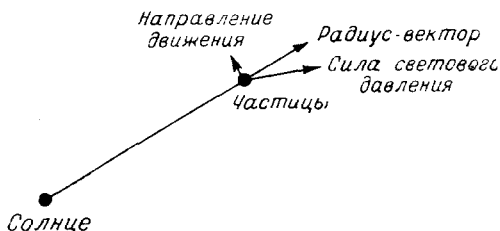


Рис. 9. Абберация и световое давление.

вектор светового давления будет образовывать угол с радиусом-вектором, равный отношению скорости движения частицы к скорости света (см. рис. 9). Конечно, этот угол мал (для Земли он равен  $20''{,}5$ ) и мала определяемая им тангенциальная составляющая силы светового давления, но следует помнить, что у этой силы уже нет никаких конкурентов. В результате радиационного торможения частица описывает спиральную орбиту, приближаясь к Солнцу. В. Г. Фесенков выводит очень простую формулу для времени выпадения частицы на Солнце (стр. 114)<sup>23</sup>:

$$\tau = 6,5 \cdot 10^6 \rho r_0^2 \text{ лет,}$$

где  $\rho$  — радиус частицы в *см*, а  $r_0$  — начальный радиус орбиты, выраженный в астрономических единицах. В. Г. Фесенков отмечает, что в формулу не входит сила солнечного притяжения. Согласно формуле В. Г. Фесенкова при  $r_0 = 1$  и  $\rho = 10 \mu$   $\tau$  равно 6500 лет, что с астрономической точки зрения представляет очень небольшой промежуток времени. Правда, далее В. Г. Фесенков указывает, что частица ещё до достижения поверхности Солнца испарится, и атомы, входившие в её состав, будут выброшены уже радиальным световым давлением за пределы солнечной системы. Во всяком случае, солнечные лучи при помощи светового давления производят своеобразную «очистку» солнечной системы от космической пыли.

Наконец, в астрономической литературе появились указания на важную роль светового давления в образовании новых космических тел из космической пыли. Оказывается, что силы ньютоновского тяготения не достаточны для объяснения таких устойчивых образований. Но к силам тяготения добавляется световое давление, вызванное светом окружающих звёзд. Световое

давление как бы подталкивает друг к другу две сблизившиеся частицы. Последнее объясняется загораживанием частицами света, благодаря чему уменьшается световое давление на обращённые друг к другу доли поверхностей частиц. Нетрудно видеть, что эта теория напоминает старинную теорию тяготения Лесажа. Лоренц даже рассмотрел электромагнитный аналог этой теории и показал, что результирующая сила будет обратно пропорциональна квадрату расстояния между частицами<sup>24</sup>.

Приведённые примеры можно было бы умножить. Они свидетельствуют о том, что П. Н. Лебедев правильно оценил огромную роль светового давления в космических явлениях.

\* \* \*

Работы П. Н. Лебедева составляют гордость отечественной науки. Имя П. Н. Лебедева навсегда вошло в историю физики как имя великого экспериментатора. Советские физики, работающие в прекрасных лабораториях, о которых П. Н. Лебедев мог только мечтать, должны всегда иметь своим девизом гордые слова П. Н. Лебедева, стоящие эпиграфом настоящей статьи.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. П. Н. Лебедев, Собрание сочинений, Москва (1913).
2. Научное наследство, т. I, под ред. С. И. Вавилова и др., М.—Л. (1948).
3. П. Н. Лебедев, Избранные сочинения, под ред. А. К. Тимирязева, М.—Л. (1949).
4. С. И. Вавилов, Пётр Николаевич Лебедев, Люди русской науки, т. I, М.—Л. (1948).
5. Сирано де Бержерак, Иной свет и т. д., стр. 138, М.—Л. (1931).
6. A. Fresnel, Ann. de Chimie et Phys. (2) **29**, 57, 107 (1825).
7. W. Crooks, Phil. Trans. Roy. Soc. **164**, 501 (1874).
8. Д. А. Гольдгаммер, Ann. d. Phys. **4**, 834 (1901).
9. УФН, **50**, 328 (1950), а также «Очерки по истории физики в России», Учпедгиз, 1949 г., стр. 286, 328.
10. A. Bartoli, Nuovo Cimento **15**, 195 (1883).
11. L. Boltzman, Wied. Ann. **22**, 33, 291, 616 (1884).
12. F. Zöllner, Pogg. Ann. **160**, 154 (1877).
13. П. Н. Лебедев, Труды Отд. физ. наук ОЛЕ **4**, вып. 2, стр. 1, см. также<sup>3</sup>, стр. 60.
14. П. Н. Лебедев, ЖРФХО (ч. физ.) **32** (1), 211 (1900).
15. П. Н. Лебедев, ЖРФХО (ч. физ.) **33** (1), 53 (1901). Ann. d. Phys., **6**, 433, 1901.
16. Р. Вуд, Физическая оптика, стр. 821, Л.—М. (1936).
17. R. T. Veuer, Amer. J. Physics **18**, 25 (1950).

18. K. Schwarzschild, Sitzber. d. Münch. Ak., Math, 31, 293 (1901).
  19. P. Debye, Ann. d. Phys. **30**, 57 (1909).
  20. «Очерки по истории физики в России», Учпедгиз, 1949 г., стр. 154 (статья А. К. Тимирязева о П. Н. Лебедеве).
  21. П. Н. Лебедев, ЖРФХО (ч. физ.) **42** (1), 149 (1900); Ann. d. Phys. **32**, 411 (1910); Избранные сочинения, стр. 195.
  22. Ф. А. Бредихин, О хвостах комет, стр. 128, М.—Л. ГТТИ (1934).
  23. В. Г. Фесенков, Метеорная материя в междупланетном пространстве, М.—Л. (1947), Вестник МГУ, Сер. физич. **11**, 29 (1949).
  24. H. A. Lorentz, Kinetische Probleme, стр. 88, Leipzig (1928).
-