

DIE GESCHICHTE DER PHYSIK

IN GRUNDZÜGEN

**von Dr. FERD. ROSENBERGER
DRITTER TEIL**

GESCHICHTE DER PHYSIK IN DEN LETZTEN HUNDERT JAHREN

ZWEITE ABTEILUNG

BRAUNSCHWEIG, FR. VIEWEG UND SOHN

1890

Ф. РОЗЕНБЕРГЕР

ИСТОРИЯ ФИЗИКИ

**ПЕРЕВОД С НЕМЕЦКОГО ПОД РЕД. И. СЕЧЕНОВА
ВНОВЬ ПРОВЕРЕННЫЙ И ПЕРЕРАБОТАННЫЙ В. С.
ГОХМАМОМ**

ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ

**ИСТОРИЯ ФИЗИКИ ЗА ПОСЛЕДНЕЕ
(XIX) СТОЛЕТИЕ**

ВЫПУСК II

**ОБЪЕДИНЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ
ИЗДАТЕЛЬСТВО НКТП СССР**

**ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ ОБЩЕТЕХНИЧЕСКОЙ
ЛИТЕРАТУРЫ И НОМОГРАФИИ**

МОСКВА—1936—ЛЕНИНГРАД

ОГЛАВЛЕНИЕ

Третий период физики в последнее столетие (приблизительно от 1840 до 1860 г.)	5
Установление закона сохранения силы. Сохранение силы. Майер, Джоуль, Гельмгольц (приблизительно от 1840 до 1850 г.).....	5
Преобразование теории теплоты (приблизительно от 1840 до 1860 г.)	61
Механика (приблизительно от 1840 до 1860 г.)	97
Оптика (приблизительно от 1840 до 1860 г.)	128
Теория электричества (приблизительно от 1840 до 1860 г.)	155
Четвертый период физики в последнем столетии (приблизительно от 1860 по 1880 г.)	184
Возникновение кинетической физики	
Философия материи (приблизительно от 1860 до 1880 г.)	190
Молекулярная механика (приблизительно от 1860 до 1880 г.)	257
Механика тепловых движений (приблизительно от 1860 до 1880 г.)	287
Спектральный анализ. Взаимодействие между световым эфиром и весовыми молекулами (приблизительно от 1859 до 1880 г.)	324
Физика звуковых ощущений. Механика звуковых движений (приблизительно от 1860 до 1880 г.)	352
Теория электричества. Электротехника (приблизительно от 1860 до 1880 г.)	379
Именной указатель	425
Предметный указатель	457

ТРЕТИЙ ПЕРИОД ФИЗИКИ В ПОСЛЕДНЕЕ СТОЛЕТИЕ

(приблизительно от 1840 до 1860 г.)

Установление закона сохранения силы

В жизни наук, в тесной связи с упадком и возникновением научных теорий, происходит постоянное чередование периодов критического сомнения и оптимистической веры в силу человеческого ума. Обветшание и отмирание воззрений, превратившихся в догмы, естественно порождает недоверие и отрицание, которые, однако, при каждой новой победе науки уступают место убеждению в реальном значении научного мышления. Однако ни одно из этих противоположных течений не удерживает за собой исключительного господства, — во всяком случае, на долгое время. Большею частью они существуют рядом в зависимости от способностей, направления и рода занятий научных работников; чаша весов склоняется иногда то в одну, то в другую сторону лишь под влиянием текущего хода развития науки; в переходные же эпохи нередко наблюдается полное равновесие между обоими этими течениями.

Таким же переходным характером отличается и новейшая физика, преимущественно в смысле различной оценки методических факторов и различия взглядов на объективное, реальное значение гипотетических выводов.

До начала предыдущего периода существовало, по-видимому, полное единодушие насчет того, что в основу каждой физической дисциплины должна быть положена особая *элементарная материя* и что каждая дисциплина может быть рассматриваема как учение о силах, свойственных соответствующей материи, и, следовательно, таким путем она может быть обособлена от других физических дисциплин. По этой удобопонятной и простой схеме *механика*, например, рассматривалась как учение о *весомой материи*, *оптика* — как учение о *световом веществе*; в основу учения о *теплоте* клали *теплород*; учение о *магнетизме* и *электричестве* сводили к свойствам *магнитных* и *электрических жидкостей*. Победа, одержанная в предшествующий период *волновой теорией света*, имела своим результатом не только крушение специальной оптической теории, но и представляла собой — в противовес указанной концепции — покушение на всю вообще действующую научную систему. С принятием волновой теории оптика как бы сразу выделилась из круга прочих физических дисциплин; с этих пор

6 УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ СИЛЫ

область ее стала определяться не особой материей с особыми ее свойствами, а лишь своеобразным движением эфира — вещества, которое не имело специального отношения к свету и которое могло быть положено в основу не одних только световых, но и других физических явлений. Правда, с подобной же точки зрения уже с давних пор рассматривали другую физическую дисциплину — *акустику*: никто не объяснял звуковых явлений каким-либо особым звуковым веществом, аналогичным световому или тепловому, но все рассматривали звук только как особый вид движения весомой материи. Сторонники волновой теории света при своих оптических исследованиях всегда ссылались на акустические аналогии, а Т. Юнг даже прямо брал их за исходную точку в своих работах. Но, с одной стороны, под влиянием долгой привычки не замечали противоречия этого факта господствующему воззрению, а с другой стороны, акустика была, как бы исключена из числа самостоятельных физических дисциплин и рассматривалась только как некоторый придаток к механике. Подобное отношение к акустике представлялось тем более естественным, что до того времени физика почти не останавливалась на *звуковых ощущениях*, а занималась исключительно вопросами о происхождении и распространении звука. Более правильно было оценено принципиальное значение выдвинутых *Румфордом*, *Дэви* и другими в начале прошлого столетия возражений против *теплорода*, которых не удалось опровергнуть и с фактической стороны. Однако и здесь противники не сдались. Противопоставив новым фактам необходимость единства воззрений на явления природы, они стали подыскивать в прочно сложившейся системе господствующих теорий убедительные аргументы, которые как будто говорили в пользу реального существования оспариваемого вида материи.

По отношению к новой теории света подобные возражения были, конечно, уже немислимы. Благодаря редкому сочетанию математического гения с экспериментальной изобретательностью науке удалось установить основы волновой теории с такой полнотой, что не осталось ни одной самой запутанной проблемы, каковы, например, дифракция и поляризация света, которая не была бы доступна математическому анализу; гипотезы, входившие в состав этой теории, находили при этом тысячекратное подтверждение и давали даже возможность наперед указать будущие оптические открытия, которые и подтверждались впоследствии с астрономической точностью. Теория истечения отжила, таким образом, свое время, и световое вещество было без возражений вычеркнуто из числа реально существующих объектов. Вместе с тем, однако, перед каждым вдумчивым физиком действительно возникал вопрос, следует ли при истолковании явлений совершенно отбросить элементарные виды материи с их первичными силами и сводить все явления к особым видам движения или же пока сохранить оба метода объяснения оптических явлений как равноправные. Последнее становилось, впрочем, все

УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ СИЛЫ 7

труднее, так как вообще понятие о невесомых проявляло все больше и больше тенденцию к исчезновению. Уже в предшествующем периоде Ампер своей *электромагнитной теорией* опроверг реальное существование магнитных жидкостей, и хотя его гипотезы еще долгое время не достигали достоверности френелевского учения о свете, тем не менее, они придали большую вероятность предположению, что еще одна физическая дисциплина должна иметь своим основанием не особую материю, а особый род движения. Вдобавок к этому в конце прошлого и начале настоящего периода и *учение о теплоте*, по крайней мере, наполовину, освободилось от ига старой теории и вступило на новый путь. Обширные и тщательные исследования Меллони, Кноблауха и других с полной строгостью доказали, что тепловые лучи во всем, что не связано прямо с длиной волны, совершенно тождественны со световыми, а в отношении преломления, отражения, дифракции и поляризации соответствие между ними таково, что формулы, выведенные для одних лучей, могут быть прямо применены и к другим. Не оставалось, таким образом, ни малейшего сомнения, что тепловые лучи распространяются при помощи той же среды, как и световые, т. е. при посредстве эфира, и что *лучистая теплота*, во всяком случае, не имеет ничего общего с теплотой.

Конечно, несмотря на одержанные ею победы, новой теории света предстояло еще преодолеть значительные трудности, корни которых лежали, главным образом, в невыясненном отношении эфира к весомай материи. Правда, та же неясность имела место и при прежнем представлении о световом веществе, но теперь вследствие большей наглядности новой теории эти недочеты выступили резче прежнего. В предшествовавшем периоде мы уже указывали на не вполне успешные усилия выяснить сущность явления *дисперсии*; теперь предстояло преодолеть еще большие трудности по отношению к *поляризации*. Френель считал, что колебания поляризованного света происходят перпендикулярно к так называемой плоскости поляризации; позднее Нейман при объяснении этого явления исходил из прямо противоположного предположения. Этот вопрос много обсуждался, однако, не был окончательно разрешен, так что и теперь в случае голосования можно было бы ожидать, что голоса разделятся поровну. Точно так же для объяснения *отражения* света прозрачными телами Френель принимал, что отражение света происходит на плоскости, а Жамен и другие доказали, что вытекающие отсюда поляризационные состояния отраженных лучей не вполне соответствуют действительности. Вследствие этого френелевские формулы для интенсивности отраженных и преломленных лучей должны были утратить свое строгое значение, и Коши попытался вывести новые, более согласные с опытом формулы, допустив мгновенное возникновение *продольных волн* вблизи поверхности отражения. Но, с одной стороны, и эти формулы могли быть только приближенными, так как при их выводе не было принято в расчет погло-

8 УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ СИЛЫ

щение света, а с другой стороны, предположение, сделанное Коши, сочли необходимым заменить другим, более вероятным, которое, однако, в свою очередь, не могло обеспечить выводам полной достоверности. В теории *абберации* света встретились с новыми затруднениями вследствие того, что согласно волновой теории нельзя было непосредственно допустить полной независимости движения света в прозрачном теле от собственного движения последнего. Однако вскоре опыты Физо показали, что допустить такую независимость можно и при волновой теории; при этом произведенные для этой цели измерения скорости света в воздухе, жидкостях и твердых телах привели даже к прямым экспериментальным доказательствам в пользу волновой теории и против теории истечения. Наконец, все более частое применение в оптике *акустических аналогий* и их безусловная плодотворность ясно говорили в пользу кинетической разработки физических проблем. *Фосфоресценция*, которой вновь стали заниматься с большим интересом, представляла собою, правда, явление не неблагоприятное для теории истечения; но, с другой стороны, — путь к выяснению истинного значения *флюоресценции*, находящейся, несомненно, в тесной связи с фосфоресценцией, был указан лишь волновой теорией и законы ее были установлены впервые с помощью последней. Точно так же открытие Доплером изменения цвета вследствие движения источника света или тела, воспринимающего свет, могло быть сделано лишь на почве волновой теории, хотя для данного периода оно и явилось преждевременно созревшим плодом. Наконец, быстро расцветшая как раз в этот период *физиологическая оптика* показала, что даже для теории светового ощущения нет никакой необходимости в допущении особого светового вещества с особыми силами ощущения.

К сожалению, все эти доводы, столь благоприятные для кинетических воззрений на явления природы, уравновешивались *неудачами в области электричества*. Попытка непосредственного применения волновой теории к электрическим явлениям совершенно не удалась: на электричестве не удалось констатировать ни одного из характерных явлений колебательного движения, как отражение, преломление, дифракция, интерференция и т. п. Какими-либо другими, не колебательными движениями эфира объяснить электрические явления тоже не удалось; единственное приближение к эфирной теории электричества заключалось в том, что, вернувшись с Фарадеем к *унитарной теории*, стали высказывать мысль о возможности отождествить принятую единую электрическую жидкость с эфиром. Однако и после этого многие французские и немецкие физики, в особенности физики-математики, продолжали придерживаться дуалистической теории электричества ввиду большого удобства ее применения, не предаваясь при этом сомнениям теоретико-познавательного характера.

Из всех физических дисциплин *механика* в описываемый нами период, по-видимому, меньше других нуждалась в обновлении, так как переворот в физике коснулся сперва только невесомых.

УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ СИЛЫ 9

Трудности, встречавшиеся при изучении *вращения* тел, в особенности при исследовании особых движений на вращающихся телах, носили по существу математический характер, и как раз здесь, в той области, откуда экспериментальная физика была, как будто вовсе исключена, последняя отпраздновала ряд побед. Опыты с *падением* и *бросанием тел*, *вращательные приборы* и в особенности *маятник Фуко*, примененный для доказательства вращения земли, возбудили столь живой интерес к механическим проблемам, какого уже давно не наблюдалось. И все-таки механика должна была постепенно, хотя сначала почти незаметно, быть втянутой в общий переворот воззрений. На это указывала уже все более и более возраставшая неуверенность в правильности обоснования так называемых *начал механики*, выразившаяся в этот период в многочисленных и тщетных попытках обосновать *параллелограмм сил*. Непосредственные, трудно преодолимые препятствия представляла в особенности механика *молекулярных сил*. При выводе явлений движения весомых конечных масс формула сил Ньютона была для аналитической механики вполне достаточна, а необходимый для образования системы элемент отталкивания уже сам Ньютон вполне кинетически объяснил центробежной силой, т. е. сохранением движения. Но поскольку в телах не признавали движения молекул, *молекулярная механика* должна была допустить наряду с притяжением также и *отталкивание* молекул, причем относительно последнего было только установлено, что оно должно убывать с расстоянием гораздо быстрее, чем притяжение. Но так как эту силу отталкивания пришлось совершенно отождествить с отталкивательной силой тепла, то тем самым механика была, очевидно, поставлена в зависимость от судьбы невесомых, что, впрочем, привело к неизбежным выводам лишь в последующий период, с возникновением новой теории газов. Однако независимо от этого молекулярная механика заключала в себе много других невыясненных элементов. В то время как математик, работая в области механики, пытался свести все явления к действию двух упомянутых противоположных сил, физик был вынужден для объяснения молекулярных явлений принимать другие, не первичные, а производные силы, вывод которых из элементарных сил был неясен или же оставался совершенно необоснованным. Возбудившие всеобщий интерес опыты Плато, касавшиеся свойств *жидких пленок*, удивительные явления быстрого *расплывания жидкостей по жидкостям*, усердно проводившиеся работы по *волосности*, *диосмосу*, *диффузия жидкостей* и *газов* (где с особым успехом работал Грэхем), интересные возбудившие столь большие надежды опыты Мозера с *осаждением паров*, *абсорбция газов жидкостями* и твердыми телами, *растворение* последних в жидкостях — все эти явления требовали и подтверждали разделение молекулярного притяжения на две различные силы: *сцепление* и *прилипание*. Но о том, как вывести их из общего источника, из силы притяжения, и чем принципиально объяснить их различие в отдельных телах, об этом едва решались судить. Ко всему

10 УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ СИЛЫ

этому прибавились еще новые силы, которых нельзя было свести ни к сцеплению, ни к прилипанию. Таковы были: введенное Пуассоном и теперь вновь подтвержденное *поверхностное натяжение*, *осмотическая сила* Грэхема и *вязкость*, проявляющаяся не только в жидкостях, но и газах, и вызывающая явления, которые, правда, обозначили определенным термином *внутреннего трения*, но которые были достаточно внимательно исследованы лишь в течение последующего периода. Наконец, даже впервые теперь удавшийся опыт *сжижения газов* с помощью давления не укладывался в рамки старой физики, поскольку им стирались прочные грани между различными агрегатными состояниями вещества.

Таким образом, положение физики в этот период становилось все более и более хаотичным. Наряду с весомой материей, невесомыми электрическими жидкостями и, пожалуй, еще одной невесомой жидкостью — теплородом, существовал еще и эфир, о котором не знали, считать ли его весомым или невесомым. При этом невесомые жидкости перемещались друг по другу, сталкивались и проникали друг в друга таким образом, что допустить эту путаницу можно было, лишь исходя из мысли о совершенно нематериальной природе этих веществ. Такому дуализму материи в полной мере соответствовал и дуализм действия сил. Весомой материи, как и старым невесомым, были присвоены элементарные силы, которые действуют на расстоянии непосредственно, независимо от состояния движения вещества; эфир же проявлял свои силы лишь с помощью движений, способных переходить от одного места к другому не мгновенно, а постепенно, с конечной скоростью.

Все это, конечно, требовало каких-то изменений, но осуществить последние было труднее, чем держаться старого. После решительного фиаско Гегеля *натурфилософии* как философской науки не существовало, а самому физики обратиться к натурфилософии тотчас же после своей борьбы против философии не представлялось возможным; таким образом, науки, построенной на единстве воззрений на материю и силу, по всем признакам не существовало. К этому присоединилось еще и то обстоятельство, что значение *атомистики*, служившей до сих пор наиболее твердой опорой теории материи, в это время было поколеблено в самой ее основе — в области химии. Атомная теория, столь содействовавшая до сих пор прогрессу химии, становилась все более беспомощной в объяснении постепенно усложнявшихся химических явлений. Многочисленные *изомерии*, *метамерии* и *полимерии*, равно как постоянно возрастающее число *аллотропических модификаций*, были, по-видимому, несовместимы с принятой неизменностью атомов; одна значительная школа химиков вовсе отбросила атомы как ненужную фикцию и даже заменила термин «атомный вес» выражением «эквивалент»¹. Поэтому неудивительно, что значи-

¹ В своих „Vorträge über die Entwicklungsgeschichte der Chemie in den letzten hundert Jahren“ (Braunschweig 1887, стр. 188) А. Ладенбург писал о химии в начале 40-х годов: „Гмелинская школа значительно усилилась, и атомистическая,

УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ СИЛЫ 11

тельная часть физиков, еще не вполне освоившихся с крушением старой системы, считала невозможным систематическое построение науки на более глубоких, хотя непосредственно и необозримых началах; новые открытия, казалось, указывали им, что не следует выходить за пределы прямого наблюдения и что всякий закон природы может быть строго установлен лишь посредством эмпирических приближенных формул. Таким физикам представлялось научно допустимым только описание непосредственно наблюдаемых явлений и надежными лишь правила, индуктивно выведенные из многих наблюдений; гипотезы же о причинах явлений представлялись для них при всех условиях лишь вспомогательными построениями, облегчающими общее обозрение результатов и вывод законов, но лишенными всякого объективного значения. Благодаря этому физические гипотезы, с одной стороны, представлялись совершенно произвольными и могли быть совершенно несвязанными между собою и даже противоречащими друг другу, а с другой стороны, — оперирование с такими не реальностями считалось вообще опасным, и тем опаснее, чем стройнее была теория и чем шире был круг ее применения. Физики этой школы становились особенно нетерпимыми в тех случаях, когда гипотеза в своем развитии приобретала заманчивый облик реальности. Тогда выражение Ньютона «я не строю гипотез» они превращали в инквизиторское правило: «не смейте строить гипотез».

Однако, несмотря на этот запрет и даже на несколько аутодафе, совершенных в честь последнего, те из физиков, которые продолжали сознавать потребность в более глубоком причинном изучении явлений и не утратили веры в возможность познания мира, продолжали заниматься вопросами о внутренней сущности явлений и их причинной зависимости и требовать реальности всех признанных материй и сил, по меньшей мере, как идеала человеческого познания. При таком взгляде на дело представлялось необходимым разрешить основные противоречия в науке — произвести выбор между различными элементарными невесомыми и единым эфиром или, еще глубже, — между различными первичными силами, приписываемыми ввиду разнородности их действия различным материям, и непрерывными движениями (которые все можно переносить на части материи) как всеобщей причиной явлений. Однако прямой доступ к невесомым был невозможен, так как они представляли собою по существу не что иное, как абстрактные основы для определенных действий силы;

теория показалась ей слишком гипотетичной... С падением системы Берцелиуса, единственной системы, которая охватывала всю науку с единой точки зрения... у многих появилось некоторое отвращение ко всякой спекуляции, которую стали считать преждевременной и вредной для науки. Своевременным считалось только трезвое истолкование наблюдений. Так как для этой школы формулы давали лишь сокращенный способ изображения состава тел, то она имела право выбирать произвольно свои эквиваленты из ряда кратных; руководящим началом для нее служила лишь простота выражения".

12 УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ СИЛЫ

следовательно, если желательно было добиться ясности, приходилось начинать с *проблемы сил*.

Этим по существу одинаковым путем и пошли два передовых бойца новейшей физики — Роберт Майер и Джоуль, с тою лишь разницею, что первый исходил прямо из общей проблемы, а специальную проблему привел лишь в качестве примера; второй же, исходя из этой частной проблемы, отсюда уже поднялся до общей. Оба они исходили из полной взаимной превратимости сил как из вполне установленного факта, и оба они установили постоянство отношения этих превращений во всех случаях, но Майер установил такое постоянство в самом общем виде для всех сил вообще, а частный случай постоянства отношения для взаимного превращения теплоты и механической работы привел только в качестве примера; Джоуль, наоборот, сначала путем многочисленных и тонких опытов определил механический эквивалент теплоты и уже потом высказал мысль, что аналогичное постоянство отношений является, по меньшей мере, вероятным и при превращении всех других сил.

Благодаря работам Джоуля *закон сохранения силы* был очень скоро признан. Вместе с тем устранение невесомой материи как реального вещества стало совершенно неизбежным, так как превращение, при котором одна сила непрерывно порождается, между тем как другая все время исчезает в совершенно определенном отношении, мыслимо лишь при условии, если силы рассматриваются не как особые свойства неразрушимых и непревратимых материй, а как действия различных движений.

Прежде всего, этот вывод был применен к теплороду, который и покончил свое существование тотчас же после появления закона сохранения силы. Уже в первых своих работах Джоуль показал, что как тепло весомых тел, так и свободная лучистая теплота, должны быть сведены к движению и именно к движению материальных молекул. Майер тоже самым решительным образом отрицал материальность теплоты, и физики, за немногими исключениями, присоединились к этому воззрению. Затем Клаузиус, Томсон и Ранкин взяли на себя трудную задачу: механическое действие теплоты, которое Карно столь удачно объяснил падением теплорода, вывести из тепловых движений и тем самым построить теорию термодинамических машин на новых теоретических основаниях. Благодаря их исследованиям, наряду с законом сохранения силы как *первым началом* было разработано *второе начало* новой теории теплоты, гласящее, что не вся теплота, заключенная в теле, может быть просто превращена в механическую работу. В связи с этим вторым началом возник длинный спор по вопросу о границах его применимости, оставшийся неразрешенным и до настоящего времени. Однако именно этот спор очень много способствовал дальнейшему развитию воззрений в новом направлении. Благодаря тому, что во время этих дискуссий ученые рассматривали проблемы теплоты исключительно с точки зрения особого рода движения, они мало-помалу

УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ СИЛЫ 13

вышли из специальной области теории теплоты и вступили в область более общих механических представлений. *Благодаря этому второе начало, постепенно расширяясь, превратилось в общее механическое начало; вместе с тем все вообще физические дисциплины, освободившись от ига невесомых, начали развиваться как отдельные части единой механической или, лучше сказать, кинетической физики.* Подобный же процесс превращений претерпело между прочим и трудное понятие *температуры*, которая сначала определялась как тепловое ощущение, потом как эффект теплового обмена, а затем в конце концов была сведена к движению и, следовательно, опять-таки получила механическое истолкование.

Нам остается еще упомянуть о характерном для нового времени развитии в области *электричества*. Выше было уже указано, что попытки отказаться от невесомых здесь меньше всего удались, а попытки создать механическую теорию электричества оказались совершенно неудачными. Несмотря на это, В. Вебер, тоже неотступно придерживавшийся электрических жидкостей, выступил с работой, в которой он доказал, что формула сил Ньютона совершенно недостаточна для характеристики электрических действий, что притягательные и отталкивательные силы электрических жидкостей не являются независимым от движений, как того требуют ньютоновские представления, и что они зависят не только от скорости, но и от ускорения движения. Таким образом, прежде всего Веберу удалось освободить и электрические силы от старого представления, что они являются элементарными свойствами материи; с другой стороны, он, по крайней мере, частично, свел действие их к движению, положив, таким образом, начало неизбежно последовавшей затем, как мы увидим, разработке вопроса в этом направлении. Той же цели Вебер способствовал введением в теорию электричества *абсолютной системы мер*: в самом деле, если все действия электричества можно полностью выразить в абсолютных единицах массы, пространства и времени, то эти действия должны быть совершенно независимы от каких-либо специфических электрических жидкостей.

Следует, однако, заметить, что в течение ближайшего периода, подлежащего нашему рассмотрению, были заложены собственно только первые основы новых воззрений, новой механической физики; вполне же сознательное дальнейшее развитие нашей науки в этом новом направлении приходится в большинстве случаев на следующий период. Доказательством этому служит, между прочим, тот факт, что на закон сохранения силы зачастую смотрели только как на обобщение правила, давно уже известного в отдельных специальных случаях, и лишь в течение последующего периода вполне оценили его плодотворное значение.

СОХРАНЕНИЕ СИЛЫ. МАЙЕР, ДЖОУЛЬ, ГЕЛЬМГОЛЬЦ (приблизительно от 1840 до 1850 г.). Вместе с установлением закона инерции была признана и неразрушимость движения. Поэтому для физиков, которые не признавали других сил, кроме живой силы удара, иных причин движения, кроме движения же, — *сохране-*

14 ПЕРВАЯ РАБОТА МАЙЕРА

ние силы являлось основным началом всего естествознания, непосредственно вытекавшим из закона инерции. Поэтому *Декарт* высказал это начало ¹ с полной уверенностью в его очевидности, а следы такого взгляда встречаются задолго до него еще у *древних физиков-атомистиков* ². Иначе обстояло дело для тех физиков, которые в качестве причин движения приписывали материи *первичные силы*, допуская, что покоящееся тело само по себе способно приводить в движение другие тела. Если при этом так называемом *динамическом* воззрении на материю, безраздельно господствовавшем со времен Ньютона, и было вообще возможно установление единого закона для всех сил, действующих во вселенной, то лишь при условии невключения в него элементарных сил материи — поскольку последние вообще при известных условиях могут вызвать движение — и распространения этого закона только на ограниченные *дее- или работоспособности*, присущие телам в силу заданных их *взаимоотношений* или *их положения* во вселенной. Но поскольку различного рода деятельности как весомых, так и невесомых веществ рассматривались в их общей совокупности, закон сохранения силы не имел смысла. Лишь после того как научились принимать во внимание зависимость величины действия элементарных сил от заданных пространственных отношений, стало понятным постоянство ограниченной таким образом работоспособности вселенной. Правда, в некоторых сочинениях, посвященных измерению определенных действий сил, в математическом определении понятия работы уже встречаются указания на закон сохранения силы, однако общее признание его в качестве основного начала физики могло последовать лишь после того, как была доказана зависимость всех вообще физических действий сил от определенных пространственных отношений и было ясно сформулировано и постулировано новое понятие о силе как определенной работоспособности. Это бесспорно впервые сделал *Юлиус Роберт Майер*. Но так как это достижение не явилось результатом какого-нибудь осязательного, *вновь открытого явления*, а имело главную свою ценность в выставленном им требовании *нового воззрения* на силу, то по установившемуся с давних пор порядку это достижение сначала не было понято и признано. Заслуга Майера даже в настоящее время оспаривается теми односторонними физиками, которым угодно считать научным один только экспериментальный метод исследования.

Первую свою работу Майер опубликовал в мае 1842 г. под малоудачным заглавием «*Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur*» ³ («Замечания о силах неодушевленной природы»). Она начинается следующими словами: «Целью нижеследующих строк является

¹ „Principia philosophiae, II, § 36.

² См. *G. Berthold*, Notizen zur Geschichte des Princips von der Erhaltung der Kraft, „Pogg. Ann.“, CLVII, стр. 342.

³ „Ann. d. Chem. u. Pharm. von Wöhler und Liebig“, XLII, стр. 233, 1842; перепечатано в „Die Mechanik der Wärme“ von J. R. Mayer, стр. 3—12, Stuttgart 1874. *Поггендорф* не принял этой статьи для своего журнала и не поместил у себя ни одной из последующих статей Майера.

(Упомянутая работа Майера, вместе с тремя другими статьями на ту же

О СИЛАХ НЕОДУШЕВЛЕННОЙ ПРИРОДЫ 15

попытка ответить на вопрос, что следует понимать под «силами» и как они относятся друг к другу... Силы являются причинами, следовательно, к ним вполне применимо положение: *causa aequat effectum* ...¹ В цепи причин и действий, как это вытекает из природы равенства, не может когда-нибудь один член или какая-нибудь часть члена стать нулем: это первое свойство всех причин мы называем их *неразрушимостью* ... Другое существенное свойство всех причин заключается в их способности принимать различные формы. Принимая во внимание оба эти свойства, взятые совместно, мы говорим: причины суть (количественно) *неразрушимые* и (качественно) *превратимые* объекты... Причина, обуславливающая поднятие груза, есть сила; ее действие, *поднятый груз*, есть, следовательно, тоже *сила*; или, выражаясь, общее: *пространственная разность весовых объектов есть сила*; так как эта сила обуславливает падение тел, то мы называем ее *силой падения*. Показав, таким образом, на примере правильное понятие силы и ее признаков, Майер пытается разрушить старое ходячее представление о силе. «Рассматривая тяжесть как причину падения тела, говорят о силе тяжести и смешивают, таким образом, понятия силы и свойства; как раз то, что должно быть существенно присвоено каждой силе, *соединение* неразрушимости с превратимостью, отсутствует у всякого свойства... Если тяжесть называют силой, то при этом представляют себе причину, которая производит действие, не убывая сама по себе, и таким образом поддерживают неправильные представления о причинной зависимости вещей. Для того чтобы тело могло упасть, его поднятие не менее необходимо, чем его тяжесть, поэтому падение тел нельзя приписывать только последней». Связь между силой падения и силой движения, равно как отношение их взаимной превратимости, уже давно определена и известна; но часто мы видим, что движение прекращается без того, чтобы оно вызвало другое движение или же привело к поднятию тяжести. Для того чтобы в подобных случаях определить, что произошло в результате исчезнувшего движения, следует применять для наблюдения такие приборы, которые, останавливая движение, сами по возможности изменялись бы как можно меньше подлежащими исследованию объектами. Так, например, если при трении друг о друга двух металлических пластинок мы наблюдаем наряду с уничтожением движения образование теплоты, то возникает вопрос, составляет ли движение причину тепла. Но при таком трении не происходит никакого изменения пластинок, кроме образования металлической пыли; однако последняя не может быть причиной исчезнувшего движения, так как из пыли, конечно, нельзя получить обратно движения. «Повторяем, движение не может превратиться в ничто, а противоположные или положительные и отрицательные движения нельзя считать равными нулю, совершенно так же, как из нуля не могут возникнуть противоположно направленные движения, как не может сам собою подняться груз... Поскольку установлено, что во

тему, переведены на русский язык и выпущены в свет ГТТИ, под заглавием: *Роберт Майер, Закон сохранения и превращения энергии, 1933. Прим. ред.* ¹ Причина равновелика действию.

16 ПОНЯТИЕ СИЛЫ У МАЙЕРА

многих случаях (*excepcio confirmat regulam* — исключение подтверждает правило) для исчезнувшего движения нельзя найти никакого другого действия, кроме теплоты, и для образовавшегося тепла никакой другой причины, кроме движения, мы предпочитаем принять положение, что тепло возникает из движения, чем допустить существование причины без действия или действия без причины... Естественную связь между силой падения, движением и теплотой можно себе наглядно представить следующим образом. Мы знаем, что тепло появляется при сближении отдельных частей массы какого-либо тела; сгущение развивает тепло; но то, что справедливо для мельчайших частиц массы и их мельчайших промежутков, должно быть применимо и к большим массам и к их измеримым расстояниям. Опускание груза есть действительное уменьшение объема тела земли и должно, конечно, стоять и в связи с проявляющимся при этом теплом; теплота эта должна быть точно пропорциональна величине груза и его (первоначальному) расстоянию... Если силы падения и движения равны теплоте, то, конечно, и теплота должна быть равна движению и силе падения. Как тепло возникает в качестве действия при уменьшении объема и при прекращении движения, точно так же исчезает тепло в качестве причины при наступлении его действия, как-то: движения, увеличения объема и поднятия груза. В водяных силовых установках возникающее благодаря постоянному уменьшению объема, испытываемому землей вследствие падения воды, и затем исчезающее движение непрерывно развивает значительное количество теплоты; наоборот, паровые машины служат для превращения теплоты обратно в движение или для поднятия груза. Локомотив с его поездом можно сравнить с перегонным аппаратом: теплота, подводимая к котлу, переходит в движение, а последнее в свою очередь выделяется на осях колес в виде значительного количества тепла. В этой работе Майер не входит в рассмотрение взаимных отношений между другими физическими силами, кроме силы падения, теплоты и движения; заканчивает он ее, не отмечая при этом важности или новизны последующего изложения, определением количественного отношения, в котором превращаются друг в друга сила падения и теплота, или, как мы теперь говорим, определением механического эквивалента теплоты¹. «Мы заключим наши тезисы, вытекающие с необходимостью из основного положения *causa aequat effectum* и находящиеся в полном согласии со всеми явлениями природы, одним практическим выводом. — Для решения уравнений между силой падения и движением должно быть определено с помощью опыта пространство падения за определенное время, например за первую секунду; точно так же для решения уравнений между силой падения и движением, с одной стороны, и теплотою — с другой, необходимо ответить на вопрос, как велико количество тепла, соответствующее определенному количеству силы падения или движения. Так, например, мы должны были бы определить, на какую высоту над поверхностью земли следует поднять

¹ Последующие слова, приведенные из работы Майера без изменений сокращений, являются заключительными строками этой работы.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ЭКВИВАЛЕНТА ТЕПЛОТЫ 17

определенный груз, чтобы его сила падения была эквивалентна нагреванию равной ему по весу массы воды от 0 до 1°? Что такое уравнение действительно имеет свое основание в природе, может быть рассматриваемо как резюме всего изложенного выше. Применяя установленные выше положения к тепловым и объемным отношениям газов, мы найдем, что снижение столба ртути, сжимающего газ, равно количеству тепла, освобожденному в результате сжатия; а отсюда получается — если принять отношение теплоемкостей атмосферного воздуха при постоянном давлении и при постоянном объеме равным 1,421,— что снижению некоторого веса с высоты около 365 м соответствует нагревание равного ему веса воды от 0 до 1°. Если с этим результатом сравнить полезное действие наших лучших паровых машин, то станет ясно, что лишь незначительная часть тепла, подводимого к котлу, действительно превращается в движение или поднятие груза; и этим можно было бы вполне оправдать попытки открыть выгодный путь получения движения не путем использования химической разности между С и О, а иным способом, а именно путем превращения в движение электричества, полученного с помощью химических процессов».

Работа Майера была для научного мира ударом по воде, или, точнее, холостым выстрелом; это оправдывается, хотя и не объясняется, самой статьей. Заглавие ее было слишком мало выразительно, чтобы обратить на себя внимание. Попытка выработки нового понятия силы была выражена слабо и, во всяком случае, необходимость такой реформы не была выявлена. Величина механического эквивалента тепла была выведена неясно и непонятно, причем это было сделано как-то мимоходом и только в виде простого практического примера.

Все эти недочеты были устранены в работе, появившейся три года спустя и содержавшей в себе полное, систематическое развитие новых воззрений. Однако и на этот раз заглавие «Die organische Bewegung in ihrem Zusammenhange mit dem Stoffwechsel» («Органическое движение в связи с обменом веществ») ¹, к сожалению, не охватывало всего содержания работы. Именно, здесь Майер рассматривает не только органическое движение, но восполняет то, что не было сделано в первой статье, — он дает вполне ясное систематическое развитие нового понятия силы, применение этого понятия ко всем физическим силам и, наконец, обстоятельный вывод механического эквивалента тепла. Поэтому вторую статью и следует считать собственно основным трудом Майера, а первую — только предварительным сообщением, имевшим лишь целью закрепить за автором приоритет открытия.

Здесь Майер снова начинает с рассмотрения понятия силы. «Понятия, разработанные механикой для своих собственных целей, развиваются другими науками дальше, чем этого требовал бы их первоначальный смысл. На вопрос, что следует понимать под «телом», геометр ответит: «Да не осудят меня физик, зоолог, психолог и т. д., но, согласно нашим понятиям, тело есть пространство, ограниченное в трех измерениях». Механик, представляющий себе возникновение,

¹ Heilbronn, 1845. — Помещена в „Die Mechanik der Wärme" von J. R. Mayer, стр. 13—126, Stuttgart 1884.

18 ГЛАВНАЯ РАБОТА МАЙЕРА (1845 г.)

изменение и прекращение каждого движения как результат некоторого давления, называет последнее *in abstracto* (абстрактно) «силой»; способность же массы производить подобное давление — *тяжесть* — он называет некоторой силой. Но, не останавливаясь на абстракции механики «сила равна давлению», в других науках тяжесть сделали типом силы и вызвали этим искусственное смешение понятий: свойство, сила, причина, действие; этим создали огромное препятствие для построения здания науки¹. *Поэтому прежде чем приступить к исследованию физиологических законов, да позволено нам будет условиться с читателем насчет понятия силы».*

Новое определение понятия силы Майер развивает затем совершенно так же, как в первой своей работе, но только здесь он высказывает свои положения более определенно и ясно. «Что химия выполняет по отношению к материи, — говорит он, — то должна выполнить физика по отношению к силе. Изучить силу в ее различных *формах*, исследовать условия ее *превращений* — такова единственная задача физики: ибо как *возникновение*, так и *уничтожение* силы лежит за пределами человеческого мышления и действия... *В действительности существует только одна единственная сила*. В вечной смене циркулирует она и в мертвой и в живой природе. И там и здесь нет процесса без изменения формы силы!»

Движение и сила падения представляют собою отдельные формы силы: их неразрушимость при взаимном превращении давно уже признана механикой в форме начала сохранения живой силы. «*Теплота* есть сила, (потому что) она может быть превращена в механический эффект... Равные количества горючего материала дают при одинаковых условиях равные количества тепла; но угли, сгорающие под котлом, дают меньшее количество свободной теплоты, когда машина работает, чем в том случае, когда она бездействует... Гей-Люссак доказал на опыте, *что* упругая жидкость, переходя из одного резервуара в другой равной величины, освобожденный от воздуха, охлаждается в первом сосуде на столько же градусов, на сколько она нагревается во втором... Но равным образом установлен и тот факт, что газ, расширяющийся *под некоторым давлением*, испытывает *понижение* температуры... *Количество тепла, которое должно быть применено для того, чтобы произвести определенный механический эффект, должно быть определено экспериментальным путем*». Это определение Майер осуществляет следующим образом: «Один кубический сантиметр ат-

¹ Нет ничего удивительного в том, что Майер, устанавливая новое понятие силы, был настроен отрицательно по отношению к попытке построения материи, сделанной Кантом в его „*Метафизических основах естествознания*“, хотя в полной мере оправдать такое отношение едва ли возможно. Очень характерно в этом отношении одно место из доклада, сделанного Майером в 1870 г.: „*Материя существует и уже в самом ее существовании заключено право на существование. Когда кенигсбергский философ попытался разложить мир на центростремительную и центробежную силы, он применил очень неудачную и сбивчивую терминологию, которая принципиально неправильна и жизнеспособна... К счастью естественные науки эмансипировались от философских систем и*» опираясь на опыт, очень успешно продвигаются своим собственным путем“ („*Mechanik der Wärme*“, стр. 333).

ВЫЧИСЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ЭКВИВАЛЕНТА ТЕПЛОТЫ 19

атмосферного воздуха при 0° и при барометре, показывающем 0,76 м, весит 0,0013 г; будучи нагрет при постоянном давлении на 1° С, он расширяется на $1/274$ своего объема и тем самым поднимает столб ртути с основанием в один квадратный сантиметр и высотой в 76 см на $1/274$ см. Вес такого столба составляет 1 033 г. Удельная теплоемкость атмосферного воздуха при постоянном давлении, если принять теплоемкость воды за единицу, равна, по Деларошу и Берару, 0,267; следовательно, количество тепла, принимаемого нашим кубическим сантиметром воздуха для того, чтобы при постоянном давлении повысить свою температуру с 0 до 1° , равно тому количеству тепла, с помощью которого 0,0013Х0,267 или 0,000347 г воды нагревается на 1° . По Дюлонгу, за которым следует большинство физиков в данном вопросе, количества теплоты, которые воздух принимает при постоянном объеме и постоянном давлении, относятся друг к другу, как 1:1,421; сообразно с этим исчисляется, что для нагревания нашего кубического сантиметра воздуха на 1° при постоянном объеме требуется количество тепла, равное $0,000347/1,421=0,000244^\circ$. Следовательно, разность $0,000347—0,000244=0,000103^\circ$ и есть то количество теплоты, благодаря применению которого груз $P=1033$ г был поднят на высоту $h=1/274$ см. Отсюда после пересчета получается, что 1° теплоты равен 1 г, поднятому на 367 м или 1130 париж. фут. высоты ¹. Такой же результат получается, если вместо атмосферного воздуха взять для расчета какой-либо другой простой или сложный газ. Закон «Теплота равна механическому эффекту» не зависит от природы упругой жидкости, служащей лишь орудием для превращения одной силы в другую».

После такого совершенно точного определения механического эквивалента теплоты, основанного на лучших измерениях того времени, Майер переходит к дальнейшей оценке этого числа. По данным Либига 1 г углерода дает при сгорании 8 558° тепла — количество, которого достаточно для поднятия 3 600 000 г на высоту 1 м; т. е. «такой эффект получился бы в случае отсутствия всяких тепловых потерь. Но подобно тому как из данного количества хлора, металла и кислорода нельзя получить хлорноватую соль без образования побочных продуктов, так и теплота не может быть вся целиком превращена в движение» ². Постоянство соотношения между теплотою и силою падения и здесь доказывается столь же своеобразным способом, как и

¹ Позднее, при повторном напечатании этой статьи, Майер отмечает, что на основании новых более точных измерений Реньо для рассматриваемого соотношения между теплотой и давлением газа получается 1° теплоты = 1 г, поднятому на 425 м или 1308 парижских фут. высоты, что во всех дальнейших своих вычислениях он впредь будет применять эти последние числа.

² „Mechanik der Wärme“, Stuttgart 1874, стр. 31—32. Положение это, стоящее у Майера особняком, интересно в том отношении, что оно ясно напоминает об ограниченном значении второго начала теории теплоты по отношению к первому.

20 СИЛА ПАДЕНИЯ, ЖИВАЯ СИЛА И ТЕПЛОТА

в первой работе. «Если предположить, что вся земная кора могла бы быть приподнята вверх на поставленных повсеместно столбах, то для поднятия такой невероятной тяжести потребовалась бы затрата огромного количества тепла. Но если отсюда ясно, что *увеличение* объема тела земли, как и всякой вообще массы, связано с «переходом в скрытое состояние» соответствующего количества теплоты, то также ясно, что при *уменьшении* объема должно снова освобождаться равное количество тепла. Но то, что имеет место по отношению к земной коре в целом, должно быть применимо к любой ее части. При поднятии самой ничтожной тяжести теплота (или другая какая-либо сила) должна перейти в скрытое состояние, а при опускании этой тяжести эта теплота должна освободиться. Только что было показано, что для поднятия тяжести в один килограмм на 425 м требуется одна единица тепла; отсюда следует, что груз в один килограмм, падая с высоты 425 м, должен освободить посредством удара или трения одну единицу тепла (калорию). Традиционные предпосылки о сущности движущей силы и движения помешали физикам увидеть этот совершенно ясный факт, твердо обоснованный на опыте. Ньютон (Princ. I, Def. VIII) определенно рассматривает *тяжесть* как *causa mathematica* и предостерегает против толкования ее как *causa physica*¹. Однако это существенное различие было оставлено без внимания последователями Ньютона: тяжесть, или причина *ускорения*, принималась за причину движения, и таким образом допускалось возникновение движения *без затраты* силы, поскольку при падении груза тяжесть совершенно не потребляется. Необходимым следствием такого способа происхождения явилось допущение возможности превращения *данного* движения при некоторых условиях в ничто... Если зачерпнуть из большого бассейна, моря или океана стакан воды, то вызванной этим убыли в огромной массе воды нельзя будет заметить. Но если бы мы допустили, что в море не происходит никакой убыли вещества вследствие изъятия нескольких унций жидкости, то отсюда необходимо пришлось бы сделать тот вывод, что эти унции были созданы из ничего, а, будучи обратно отданы морю, — они снова превратились в ничто. Подобное же заключение применимо и к силам. Итак, мы ставим вопрос, является ли постоянной движущая сила, которая сообщает телу, падающему на землю с высоты 15 фут., скорость в 30 фут.? На это обыкновенно отвечают: уменьшение и увеличение тяготения для таких ничтожных высот может быть, в сущности, оставлено без внимания; следовательно — «да». Мы же говорим — «нет». Если бы сила была постоянной, то за соответствующее время она должна была бы произвести движение любой величины; для этого, однако, недостает многого. Скорость, которую может приобрести груз при падении на землю, имеет определенный *максимум*; последний составляет 345 000 фут. (11 200 м) в секунду; с такою скоростью *G* достигнет поверхности

¹ В примечании Майер определяет силу падения равной mc^2 , выражая тяжесть через dc/dt (как это было принято в то время, Майер в качестве меры работы принимал еще полное произведение mc^2).

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ 21

земли T масса m , падая из бесконечного расстояния. Следовательно, результирующая из *всего* пространственного расстояния масс T и m движущая сила, или полная сила падения массы m , равна mG^2 . Результирующая же частичная сила, вызванная частичным расстоянием между массами, есть легко исчислимая часть полной силы. Для земных высот числителем этой дроби является путь падения, а знаменателем — радиус земли. Таким образом, при падении массы m с высоты 15 фут. получается величина движения, равная $G^2 \cdot (15/196050)$ откуда скорость, с которой m упадет на землю, равна $G \sqrt{(15/196050)}$. Когда груз, падая с бесконечно большой высоты, достиг расстояния от земли, равного 15 фут., то на это было израсходовано $1\ 299\ 999/1\ 300\ 000$ полной силы падения; в остатке имеется еще $1/1\ 300\ 000$ этой силы, и при затрате этой, правда, сравнительно очень небольшой силы, может быть получено и сравнительно столь же небольшое действие, а именно движение m со скоростью 30 фут. Таким образом, ясно, что случай падения не дает оснований для каких-либо исключений из аксиоматического положения о пропорциональности между движением и затраченной на него силой. Затрата силы бывает равна нулю лишь в том случае, когда груз только производит давление, но сам при этом не опускается. *Постоянной* силы, т. е. силы, которая, проявляя действие, при этом сама не уменьшается, для физика не существует».

К движению, силе падения и теплоте присоединяется еще четвертая форма проявления физической силы — *электричество*; происходит ли оно от *трения* или через *влияние*, источником его всегда бывает затрата механического эффекта. Представим себе крышку *электрофора* уравновешенной противовесом; тогда она может без всякой затраты силы производить маятникообразные качания вверх и вниз. Представим себе, далее, что когда крышка при качании достигла самой низкой точки своего положения, под нее подставлен на надлежащем расстоянии наэлектризованный смоляной круг,— этот последний тотчас же притянет крышку, поднимет противовес и даст, таким образом, некоторый прирост силе падения. Если мы затем извлечем из крышки искру, то притяжение ее станет сильнее прежнего и для поднятия крышки потребуется теперь не только весь запас выигранной силы падения, но еще и некоторый избыток. Зато из поднятой крышки мы можем извлечь вторую искру, после чего только вся система вернется в первоначальное состояние. Таким образом затратой механической силы достигнуты два электрических эффекта и сумма последних должна быть как раз равна затраченной механической силе. К подобным же результатам приходят и при получении *электричества от трения*. «Соприкасающиеся друг с другом вещества удерживаются прочно вместе с образовавшимися противоположными электричествами; но необходимое для получения электрических эффектов разъединение этих веществ не может произойти без затраты механического эффекта. Известно также, что при образовании электричества путем трения теплота

22 ХИМИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ

от трения отсутствует. При «сообщении» электричества изложенные только что отношения притяжения обращаются в противоположные здесь затрачивается электрическая сила и получается механический эффект. При всяком сообщении электричества некоторая часть его нейтрализуется, как нейтрализуется движение при неупругом ударе».

«Совершенно так же, как получается электричество, может быть путем индукции получен за счет механического эффекта и магнетизм. Данный магнит играет роль электрофора».

Тот же самый эффект, который получается от столкновения движущихся масс, т. е. тепло, дает и *химическое соединение* известным веществ. Стало быть и «химически раздельное существование или, короче, *химическая разность материи есть сила.* Химическое соединение 1 г углерода с 2,6 г кислорода приблизительно эквивалентно соединению груза в 0,5 г весом с землею (т. е. силе падения на *землю*, половины грамма с бесконечной высоты); тем и другим путем получается соответственно 8500° и 7400° теплоты. Химическое соединение 1 г водорода (если теплоту его сгорания принять по Дюлонгу равной 34 743°) с 8 г кислорода приблизительно эквивалентно механическому соединению груза в 2 г с землею».

«Если для небольших расстояний и малых скоростей энергии механических эффектов значительно уступают более резко выраженным химическим силам, то мы видим обратное отношение, когда через окружающую нас среду обращаем наши взоры к небесным пространствам... Земля движется по своей орбите со средней скоростью 93 700 фут. в сек. Для того чтобы произвести подобное движение сжиганием углерода, пришлось бы сжечь такое количество угля, которое по весу в 13 раз превышает вес земли; освободившегося при этом количества тепла было бы достаточно для того, чтобы нагреть на 110 000° количество воды, равное по весу земле. Значит, незначительной доли той силы, с которой земля движется по орбите, было бы достаточно для того, чтобы совершенно уничтожить механическую связь между всеми частицами земной массы. Но если представить себе, что масса, равная по своей тяжести земле, лежит спокойно на поверхности солнца, то для удаления этого груза от солнца на такое расстояние, на каком находится земля (принимая расстояние земли от солнца равным 215 радиусам солнца), и для сообщения ей скорости в 93 500 фут. в сек. потребовалась бы затрата силы еще в 429 раз большая, или же количество углерода весом в 5557 раз больше веса земли и т. д. Так как химические силы представляются недостаточными для получения подобных эффектов, то можно спросить, в каком же виде следует представить себе ту затрату силы, которая некогда оказалась в состоянии вызвать движения планет? Если предположить, что «вначале» земля была удалена от центра солнца на 430 солнечных радиусов и находилась в покое, а отсюда упала по направлению к солнцу до ее нынешнего расстояния в 215 радиусов солнца, то в результате этого падения она приобрела бы нынешнюю величину своего движения. То же самое можно сказать и обо всех планетах. Большие оси их орбит дают меру первоначального расстояния небесных тел, которые предполагаются вначале находившимися в состоянии покоя; большие оси являются выражением

ОТРИЦАНИЕ НЕВЕСОМЫХ 23

величины механического эффекта, сообщенного творцом каждой планете; они неизменны, как прошлое».

I *Химическая разность является источником силы и в вольтовом столбе.* «Явления восстановления и образования теплоты и механического эффекта, которые мы наблюдаем в качестве действия столба, обязаны своим происхождением затрате некоторой силы, данному расстоянию между металлом и кислородом, между солью и кислотой». Из всего этого неизбежно вытекает высказанная им уже в начале работы аксиома: *«При всех физических и химических процессах данная сила остается постоянной величиной».* Майер, конечно, ясно сознает, какой переворот должно произвести это положение в основных воззрениях физиков, и выражает это в следующих убежденных и воодушевленных словах: *«Отстаивая alte cose (громким голосом) для движения его право на существование, его субстанциальность, мы, безусловно, должны отрицать вещественность теплоты и электричества¹.* В самом деле, не было ли бы совершенно нелепо искать сущность движения и пространственного расстояния масс в жидкости, или приписывать одному и тому же объекту попеременно то материальное, то нематериальное существование. Итак, выскажем великую истину: *«Никаких нематериальных материй не существует».* *Мы чувствуем, что здесь мы вступаем в борьбу с самыми укоренившимися гипотезами, канонизированными великими авторитетами; что вместе с невесомыми мы хотим изгнать из естествознания последние остатки богов Греции; но, с другой стороны, мы знаем, что природа в ее простой действительности выше и прекраснее любого создания рук человеческих, всех иллюзий сотворенного духа»»*

¹ В первой статье Майера имеется не вполне ясное место: „So wenig indessen aus dem zwischen Fallkraft und Bewegung bestehenden Zusammenhange geschlossen werden kann: Das Wesen der Fallkraft sei Bewegung, so wenig gilt, dieser Schluss für die Wärme. Wir möchten vielmehr das Gegentheil folgern, das, um zu Wärme werden zu können, die Bewegung — sei sie eine einfache, oder eine vibrirende, wie das Licht, die strahlende Wärme etc. — aufhören muss, „Bewegung zu sein“ („Mechanik der Wärme“, Stuttgart 1874, стр. 9—10). „Между тем сколь мало может быть на основании имеющейся связи между силой падения и движением сделан вывод, что сущность силы падения есть движение, столь же мало этот вывод имеет значение и для тепла. Более того, мы могли бы сделать противоположное заключение, что, для того чтобы сделаться теплом» движение — будет ли оно простым или вибрирующим, как свет, лучистая теплота и т. д. — должно перестать быть движением“ (*Роберт Майер*, Закон сохранения и превращения энергии, стр. 84, ГТТИ, 1933). Тэт в своих „Vorlesungen über einige neue Fortschritte der Physik“ (Braunschweig 1877, стр. 47—48) приводит это место как доказательство того, что Майера никак нельзя (не погрешая против фактов“) назвать основателем новой теории теплоты. Цитируя приведенное выше место (не полностью), он делает следующее замечание: „Кроме того, Майер далее и не думал, что теплота зависит от движения, это обстоятельство является, пожалуй, лучшим комментарием к последовательности тех, которые постоянно говорят о теплоте как „о роде движения“ и в то же время считают Майера основателем новой теории теплоты... То, что Майер сказал в своей первой работе, этого он, насколько мне известно, не изменил и впоследствии“. Очень показательным, что Тэт чрезмерно резко нападая на Майера, даже не знает вполне удовлетворительной переработки рассматриваемого места, несмотря на то, что эта переработка была трижды опубликована в работах Майера еще до издания книги Тэта в 1877 г., а именно в 1845 („Die organische Bewegung“, стр. 36, Heilbronn 1845), в 1867 и 1874 гг. („Mechanik der Wärme“, стр. 52, 2-е издан., Stuttgart 1874).

24 ИСТОЧНИК СИЛЫ ЖИВЫХ ОРГАНИЗМОВ

Только после этого общего теоретического введения Майер переходит к настоящей теме второй своей работы, к *силам органических веществ*. При этом он, по-видимому, преследует *две цели*: с одной стороны, *выполнить свою главную задачу и доказать закон сохранения силы и в наиболее трудной и загадочной области природы, в области жизни человека, животных и растений*; а с другой стороны, — *осведомить о своей работе и воззрениях товарищей по профессии, врачей, чтобы сделать свои идеи плодотворными и в этой области*.

...«Согласно человеческим представлениям, продолжает он, — солнце является неисчерпаемым источником физической силы. Поток этой силы, изливающийся и на нашу землю, есть та постоянно заводящаяся пружина, которая поддерживает ход механизма всех деятельностей на земле... Недалеко еще от нас ушло то время, когда шел спор, способно ли *растение* во время своей жизни превращать или даже производить первичные химические вещества». Но подобно тому, как невозможность созидания материи из ничего уже давно была признана естественным законом и для организмов, то же самое должно быть совершенно так же признано и для силы. Ежедневный опыт показывает, «что ничто так не препятствует согревающему действию солнечных лучей на широкую земную поверхность, как богатая растительность, несмотря на то, что растения, благодаря темному цвету своих листьев, должны поглощать большую долю падающего на них солнечного света, чем обнаженная почва». С другой стороны, во всяком растении отложен запас силы — в виде химической разности, которым мы и можем в полной мере воспользоваться, сжигая растение. Закон логического основания побуждает нас поставить в причинную связь указанное потребление солнечных лучей и накопление химической силы; во всяком случае, можно считать аксиомой, что *«при жизненном процессе происходит лишь превращение вещества и силы, на отнюдь не их созидание»*. Но, конечно, вопрос о том, каким образом растения дальше применяют силу своей химической разности, сколько из нее переходит в свободную теплоту и сколько идет на поддержание жизненных процессов, все это представляет пока еще темную область, которая для своего разъяснения требует длительных физиолого-химических исследований и точных экспериментальных определений теплоты сгорания растительных веществ.

«Физическая сила, накопленная благодаря деятельности растений, используется другим классом существ, которые присваивают себе этот запас хищническим путем и применяют его для своих индивидуальных целей. Эти существа — *животные*. Живое животное постоянно забирает у растений горючие вещества и воспринимает их — для того, чтобы вновь соединить их с атмосферным кислородом. Параллельно такому использованию протекает и деятельность животных, характеризующая их жизнь: производство механических эффектов, движение, поднятие тяжестей... В организме животного постоянно расходуется известная сумма химических сил. Тройные и четверные соединения претерпевают во время жизни важнейшие изменения, переходя большую часть в двойные соединения, продукты сгорания, которые после короткого промежутка времени удаляются наружу». Количество тепла,

РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ЖИВОТНЫХ И ПОТРЕБЛЕНИЕ УГЛЕРОДА 25

которое может быть получено при таких процессах, еще недостаточно точно установлено на опыте; но в данном случае, когда речь идет только об установлении принципа, можно ограничиваться и приблизительной оценкой.

Считают, что лошадь напряжением произвольных своих мышц в течение 8 час. в день способна в каждую минуту поднять 4400 кг на высоту 1 м. Теплоту сгорания углерода, по Дюлонгу, примем равной 8558°; поднятие тяжести, соответствующее сгоранию одной весовой части кислорода, равно 3 600 000 таких же весовых частей на 1 м высоты. «Итак, если выразить затрату химической разности, которую должна понести лошадь, чтобы произвести вышеуказанное действие — в весе углерода, — то окажется, что это животное в течение дня потребляет для механических целей 580 г углерода; в час, считая день за 8 рабочих часов, 72 г и в 1 мин. — 1,2 г. Согласно общепринятым определениям работоспособность сильного работника составляет $\frac{1}{7}$ работоспособности лошади. Человек, поднимающий за день 300 000 кг на высоту 1 м, должен на это потребить 83 г углерода; это составляет 10 г за один рабочий час и 170 мг за одну минуту.

Игрок в кегли, бросающий шар весом в 4 кг со скоростью 10 м. потребляет на эту работу в 20 км — 6 мг углерода, так как эффект сгорания 1 мг равен 3,6 км. Человек, поднимающий свое собственное тело, 72 кг, на высоту 5 м, потребляет для этого 0,1 г углерода. При восхождении на гору высотой в 3000 м расход этого человека составляет 60 г углерода, если не считать потерь механического эффекта вследствие неупругих толчков, происходящих при каждом шаге. Если бы животный организм применил весь имеющийся у него горючий материал исключительно для *механических целей*, то исчисленных количеств углерода было бы достаточно для указанных промежутков времени. Но в действительности в животном теле, наряду с производством механических эффектов, всегда имеет место и *образование теплоты*. Итак, химическая сила, заключающаяся в потребленных продуктах питания и во вдыхаемом кислороде, является источником проявления двух сил — движения и теплоты, а сумма физических сил, произведенных животным, равна величине происходящего одновременно химического процесса.

Если собрать воедино все механические проявления силы животного за некоторый определенный промежуток и, превратив их путем трения, или иным каким-либо образом, в теплоту, прибавить сюда теплоту, непосредственно произведенную телом за тот же промежуток времени, то получится в точности то количество теплоты, которое как раз соответствует одновременно происходящему химическому процессу.

Закон логического основания запрещает допустить избыток или недостаток на той или другой стороне. Единственной причиной животной теплоты и работоспособности животного является химический процесс, и именно — процесс окисления. Если Дюлонг и Дебре нашли, что производимая животным теплота приблизительно равна теплоте сгорания заключающегося в теле углерода и водорода, то это

26 МЫШЦЫ И ПРОИЗВОДСТВО МЕХАНИЧЕСКИХ ДЕЙСТВИЙ

произошло только потому, что теплоту сгорания этих веществ они приняли меньше ее действительной величины¹.

«Для того, чтобы иметь возможность превращать химическую силу в механический эффект, животные снабжены специальными органами, каких совершенно нет у растений. Таковыми являются *мышцы*. Для проявления деятельности мышцы необходимы два момента: 1) влияние двигательного нерва как условие и 2) обмен веществ как причина действия... Мышца является орудием, посредством которого достигается превращение силы, но она не является веществом, благодаря превращению которого получается действие... Поэтому длительная работоспособность мышцы пропорциональна не массе мышцы, а массе протекающей через нее крови... Происходящее повсюду в капиллярных сосудах тела окисление горючего материала порождает соответствующее количество теплоты. В этом отношении покоящаяся мышца ведет себя совершенно так же, как любая неподвижная часть тела; напротив, действующая мышца потребляет горючий материал для производства механических эффектов. При каждом действии мышцы теплота в самый момент своего возникновения становится «скрытой»... Убыль тепла во время работы была бы гораздо более заметна, и работоспособность произвольной мышцы была бы заключена в тесные пределы, если бы во время работы химический процесс как в данном месте, так и повсюду в теле не повышался... Когда организм производит механические эффекты, движения, связанные с дыханием и кровообращением, рефлекторно усиливаются; при всякой напряженной работе дыхание и биение сердца ускоряются и, понятно, тем сильнее, при одном и том же действии, чем слабее протекает в данном организме химический процесс во время покоя; действие, которое сильному человеку стоит лишь нескольких вдохов, у малокровных, хлоротичных, цианозных, цынготных субъектов может вызвать бурное усиление дыхания и кровообращения, приступы одышки и сердечные перебои».

При всем том (если желательно понять закон сохранения силы) *не следует смешивать усилия с действием*. Работа человека, поддерживающего с большим напряжением груз или стоящего неподвижно часами и т. п., равна нулю; то же самое или даже больше того может выполнить железный крюк. По-видимому, в подобных случаях утомление происходит вследствие продолжительного давления на нервные разветвления. Подобное утомление без работы не исключает и последующей работоспособности; так, ученый, простоявший вопреки правилам гигиены целый день до усталости перед своим пюпитром, совершает вечером для отдыха прогулку на соседнюю гору.

Показав, таким образом, что и в органическом мире силы никогда не создаются из ничего, что всякая работоспособность человека и

¹ Комичным представляется воззрение так называемых виталистов, которые, как, например, Рейх (*Reich, Lehrb. d. prakt. Heilkunde nach chemisch-rationellen (2) Grundlagen, Berlin 1842*), считают, что животная теплота является наследственным даром, которое передается новорожденному его родителями на жизненный его путь. „За эту светлую мысль мы пожелаем названным господам получить комнатную печь, которая постоянно одаряла бы их теплом, полученным ею от своего отца — доменной печи" („*Mechanik der Wärme*", стр. 67).

ИСТОЧНИКИ СОЛНЕЧНОЙ ТЕПЛОТЫ 27

животных возможна лишь благодаря превращению солнечной энергии, накопленной растениями, Майер развивает свою тему дальше и старается определить *источник энергии солнца*. В самом деле, если закон сохранения силы может иметь силу для всей вселенной, то и на солнце нельзя смотреть, как на замкнутый в самом себе источник энергии, и для него необходимо показать, какое место этот гигантский резервуар силы занимает в общем кругообороте сил природы. Разрешению этой задачи посвящена третья работа Майера, появившаяся три года спустя после второй (1848 г.) под заглавием «*Beiträge zur Dynamik des Himmels in populärer Darstellung*» («Динамика неба в популярном изложении») и изданная им за свой счет в Гейльбронне¹.

Эта работа начинается следующими словами: «Свет, как и звук, состоит из колебаний, которые от светящегося или звучащего тела распространяются в окружающей среде. Легко понять, что тело только тогда может сообщать окружающей его среде колебательное движение, когда оно само находится в таком же движении; ибо там, где тело находится в покое или в равновесии с окружающей средой, причины для волнообразного движения не существует. Для того чтобы колокол или струна издавали звук, необходимо, чтобы какая-нибудь внешняя сила ударила по колоколу или привела в колебание струну, и эта сила является причиной звука... Часто и удачно солнце сравнивали с непрерывно звучащим колоколом. Но что же поддерживает это небесное тело, столь величественно и чудесно наполняющее небесные пространства своими лучами, что поддерживает его в вечно неослабевающей силе и юности? Что предохраняет его от полного истощения, от наступления равновесия, дабы ночь и смертельный холод не заполнили пространства нашей планетной системы? Всеобщий закон природы, не допускающий никаких исключений, гласит, что для образования тепла необходима известная *затрата*. Эту затрату, как бы разнообразна она вообще ни была, всегда можно свести к двум главным категориям, а именно, она сводится либо к *химическому материалу*, либо к *механической работе*». Стало быть, источник солнечной теплоты следует искать в этих двух агентах и при разработке гипотезы об источнике следует выбирать между ними. Но для этого, прежде всего, необходимо определить, каково количество тепла, излучаемого солнцем за известный промежуток времени.

По Гершелю нагревательная сила солнца столь велика, что это тепло могло бы ежегодно растопить на поверхности земли слой льда в 29,2 м толщиной, а по более поздним измерениям Пуллье — толщина этого слоя льда составила бы 30,89 м. На основе последнего результата все тепловое излучение солнца в минуту определяется в 12 650 миллионов gross-калорий, где во избежание больших чисел одна gross-калория принята равной количеству тепла, нагревающему на 1° С одну кубическую милю воды, или же равной 408,54 биллионов калорий. Если бы при этом теплоемкость солнца была равна наибольшей из теплоемкостей, установленных нами для известных веществ, а именно, была равна теплоемкости воды, то, распределяя потерю тепла на всю

¹ Помещено в „*Mechanik der Wärme*“, стр. 155—242, Stuttgart 1874.

28 СОЛНЕЧНАЯ ТЕПЛОТА И ПАДЕНИЕ

массу солнца, мы получили бы ежегодное охлаждение солнца на $1,8^{\circ}\text{C}$, а общее охлаждение его за историческое время (5000 лет) составило бы 9000° . Исходя из этого числа, которое, вообще говоря, благодаря неодинаково сильному охлаждению солнечной оболочки должно иметь неодинаковое действие, можно «с математической уверенностью судить о величине возмещения, соответствующего столь грандиозному расходу».

Однако процесс горения ни в коем случае не в состоянии возместить эту постоянную потерю тепла солнцем. Если допустить, что солнце представляет собою грудку каменного угля, каждый килограмм которого, сгорая, дает 6000 тепловых единиц, то сгорание солнца было бы в состоянии покрывать общий расход тепла только в течение 4600 лет. Вращение солнца около оси тоже не может служить источником его теплоты, так как для превращения этой механической силы в теплоту потребовалось бы участие другого тела, противодействующего вращению. Но если даже допустить существование такого тела, то весь эффект вращения тела солнца (считая плотность его равномерной и продолжительность его вращения равной 25 дням) составил бы 182 300 квинтиллионов килограммометров и покрыл бы тепловую потерю всего за 158 лет. Совершенно иначе представляется это дело, когда мы рассматриваем солнце не изолированно, а как некое звено вселенной. По нашей солнечной системе пробегают, кроме известных до настоящего времени планет с их 18 спутниками, множество комет, которых, по известному выражению Кеплера, в небесном пространстве имеется больше, чем рыб в океане; сюда следует еще прибавить астероиды, число которых, судя по наблюдаемым нами о земной атмосфере падающим звездам и огненным метеорам, переходит за всякие пределы. Если бы небесное пространство было совершенно пусто и не содержало в себе никакой материи, то все эти тела кружились бы вокруг солнца с неизменной регулярностью. Но это совершенно невозможно. Сокращение времени обращения кометы Энке заставляет определенно считать, что небесное пространство наполнено материей, оказывающей сопротивление движению. Литтров по этому поводу, в полном согласии с естествоиспытателями, говорит следующее: «Если бы в мировом пространстве даже и не было другой жидкой материи, кроме той, которая необходима для существования света (будет ли этот свет сам по себе материален, как это предполагает теория истечения, или же он состоит из колебаний всенаполняющего эфира, как это принимает волновая теория), то уже ее одной было бы достаточно для того, чтобы с течением времени совершенно изменить движения планет, а вместе с тем и расположение системы, и даже совершенно уничтожить современную ее структуру, так как конечным следствием существования подобной сопротивляющейся среды должно быть падение всех планет и комет на солнце». Таким образом, со всех сторон, медленно, но непрерывно, к солнцу должен притекать неизмеримый поток весомого вещества, и, сталкиваясь с солнцем, он должен превращать механическую силу своего движения в теплоту. Для оценки получающихся таким образом количеств тепла могут служить следующие соображения. Тяжелое тело, падающее из бесконечного расстояния на небесное тело,

НА СОЛНЦЕ МЕТЕОРНЫХ ПОТОКОВ 29

приобретает при этом максимальную скорость $\sqrt{2gr}$ ¹; для поверхности солнца эта величина G составляет 630 400 m ; это число можно назвать характеристикой солнечной системы. Если же тяжелое тело падает не из бесконечной дали, а только с расстояния h , то оно упадет на

поверхность солнца со скоростью $c = G\sqrt{(h-r)/h}$, а возникающий отсюда тепловой эффект определяется в $0,00012^\circ c^2$. Следовательно, астероидные массы, скорости которых при столкновении с солнцем колеблются в зависимости от расстояния между 445 750 и 630 400 m , могли бы при своем падении на солнце дать тепловой эффект от 24 до 48 миллионов градусов, т. е. в 4000—8000 раз больше, чем сгорание равной массы каменного угля.

Так как солнце излучает ежеминутно 12 650 миллионов gross-калорий или 5,17 квадриллионов тепловых единиц, то количество падающей в каждое мгновение на солнце материи должно было бы составить от 100 000 до 200 000 миллиардов килограммов. С первого взгляда это число кажется невероятно большим, но оно тотчас же вводится в должные рамки, если принять в соображение, что луна с ее массой в 90 000 триллионов килограммов, упав на солнце, покрыла бы его тепловые потери за период от 1 года до 2 лет, а земля соответственно — за 50—100 лет. Необходимый для покрытия тепловых потерь солнца поток астероидов, падая на его поверхность, покрывал бы ежеминутно каждый квадратный метр последней массой вещества в 17—34 g . Проистекающее отсюда *увеличение диаметра солнца* стало бы заметным лишь по истечении 28 500—57 000 лет, достигнув тогда только величины одной дуговой секунды; но, с другой стороны, *период обращения земли*, а вместе с тем и продолжительность звездного года должны были бы сокращаться на более заметную величину от $7/8$ до $1/2$ сек. в год. Но так как подобное укорочение совершенно не наблюдается, то следует допустить существование на солнце постоянно чередующихся приливов и отливов, что наилучшим образом согласуется и с законом сохранения силы. В заключение Майер в пользу своей теории падения потока метеорных масс на солнце указывает, что это же явление служит, по-видимому, наиболее вероятной причиной происхождения *солнечных пятен и факелов* и что в соответствии с выводами, которые должны быть сделаны по вопросу о месте падения астероидов в силу общепринятых воззрений на нашу солнечную систему, солнечные пятна и факелы действительно наблюдаются только в зоне шириною в 30° по обе стороны от солнечного экватора².

¹ Если принять — а для больших пространств падения это необходимо, — что согласно закону Ньютона сила тяжести изменяется с расстоянием, то для скорости падения тела с высоты h на небесное тело с радиусом r и ускорением u поверхности g получается следующая формула:

$$v^2 = 2gr(h-r)/h$$

² Майер останавливается *еще на одном* земном источнике силы, на приливе и отливе, который зависит не от солнечной теплоты, а от живой силы вращения земли. Майер указывает, что и эта сила, поскольку ей приходится преодо-

30 ОБ ОСВОБОЖДЕНИИ СИЛ

Рассмотренным только что сочинением заканчивается ряд основных работ Майера. Конечно, его тема далеко еще не была исчерпана во всех возможных направлениях, однако новые пути были уже почти повсюду проложены, и оставалось только пожинать плоды его трудов. После этого, т. е. после 1848 г., Майер собственно уже не дал ничего нового ¹. Ближайшею причиною того, что он лично дальше не использовал своих идей, были, конечно, постигшие его вскоре вслед за тем *тяжелые невзгоды*. Долгое время идеи его *не получали признания* и отсутствовали *стимулы* к дальнейшей работе. С этой точки зрения следует бесконечно пожалеть, что ни один из университетов, ни одна из академий и ни одно из правительств своевременно не закрепили Майера и его труд, пригласив на работу в той области, в которой он проявил столь огромную творческую деятельность.

Только в маленькой статье размером в восемь страниц, появившейся в 1876 г. ², Майер развивает дальше основную свою идею и притом в таком направлении, в каком до того никто не думал этого сделать и которое до сих пор едва ли понято и оценено по достоинству. Закон сохранения силы гласит, что все силы способны превращаться друг в друга в определенных отношениях; но он совершенно не говорит о том, что ни одно из этих превращений, ни одно из этих преобразований силы не происходит само собой. *Ни одна сила — и это столь же непреложно, как закон сохранения силы — не превращается сама собою: для всякого превращения одной формы силы в другую требуется внешняя причина.* Но при этом превращении силы ведут себя самым различным образом. Так, *живая сила* движения преобразуется при всяком препятствии, которое ей противопоставляется, которое противодействует движению. Но так называемые *притягивательные и отталкивательные силы* для своего действия и вместе с тем для превращения требуют, наоборот, устранения препятствия. Такое устранение препятствий, или освобождение силы напряжения от сдерживающих ее оков, Майер вообще обозначает словом освобождение (Auslösung); рассмотрению этих-то процессов, скорее бегло намечающему основы, чем детальному, и посвящена указанная выше статья. *Положение causa aequat effectum*, на кото-

левать сопротивления, должна постепенно с течением времени истощаться и что это сказывается в замедлении скорости вращательного движения земли, а также в изменении периода обращения луны. Первое он исчисляет в $\frac{1}{16}$ сек. за 2500 лет, а для второго он получает еще меньшую величину. Проф. А. Фик („Pogg. Ann.“, CXXVI, стр. 660) указывает, что приоритет по отношению к последним идеям был неправильно приписан Майеру, так как уже Кант в 1754 г. высказал те же мысли в сочинении „Untersuchung der Frage, welche von der Königl. Akad. der Wissenschaften zu Berlin zum Preise für das jetzt laufende Jahr aufgegeben worden: ob die Erde eine Veränderung ihrer Achsenlänge erlitten hat?“ (*Kant's Werke*, herausgegeben von Hartenstein, т. VIII).

¹ Популярная работа „Bemerkungen über das mechanische Äquivalent der Wärme“, Heilbronn 1851 („Замечания о механическом эквиваленте теплоты“, см. упомянутое выше изд. ГТТИ, 1934.“ стр. 225—282) очень четко формулирует новое понятие силы и более резко полемизирует против так называемого ньютоновского воззрения на силу, однако принципиально нового она ничего не содержит..

² „Die Toricelli'sche Lehre und über Auslösung“ von J. R. Mayer, Stuttgart 1876; „Über Auslösung“, стр. 8—16.

ОБ ОСВОБОЖДЕНИИ СИЛ 31

ром зиждется закон сохранения силы, перестает быть верным, когда выражения причина и действие мы переносим на случаи освобождения силы, так как в последних эти выражения применяются в совершенно другом смысле. Освобождающая сила не является причиной действия в примененном там смысле, но причиной перехода причины в действие. Эти освобождающие силы мы могли бы назвать причинами второго порядка, и к ним, конечно, можно было бы применить закон сохранения силы, если б можно было с полной уверенностью допустить, что та же самая небольшая освобождающая сила, которая превращает силу напряжения в движение, уже раньше однажды была затрачена в противоположном смысле при превращении живой силы движения в силу напряжения. Однако в рассмотрение этого последнего вопроса Майер не входит. Он только утверждает, что освобождающие силы представляют для закона сохранения силы известный предел, так как никогда нельзя установить отношения между величиною освобожденных сил и величиной необходимых для этого освобождающих сил, — чего, впрочем, не следовало бы утверждать с такой уверенностью. «Бесчисленные процессы освобождения имеют тот общий отличительный для них признак, — говорит он, — что при них уже нельзя измерять единицами; поэтому освобождение вообще уже не является предметом для применения математики. Область математики, как и вообще всякое царство, имеет свои естественные границы, а наша нынешняя область лежит как раз за пределами этих границ. Бесчисленное множество процессов освобождения ускользает от всякого расчета, так как качества нельзя определить численно подобно количествам»... Конечно, здесь Майер имеет в виду преимущественно освобождение движений и ощущений у животных и у людей. В пользу этого говорят и следующие соображения Майера, которые вместе с тем дают яркую картину смелого умственного творчества гениального врача и физика. «Вступая в мир животных существ, мы видим, что вся наша жизнь связана с непрерывным процессом освобождения силы.

Все явления движения, постоянно протекающие при жизни, основаны на освобождении... Произвольные движения происходят, как известно, вследствие сокращений поперечных мышечных волокон, но освобождение происходит вследствие воздействия свободных от ганглий двигательных нервов... Воля передается, правда, совершенно загадочным и непостижимым образом, двигательными нервами соответствующим мускулам, и таким путем тотчас же наступает освобождение, желательное действие. При этом я считаю необходимым обратить внимание на одно обстоятельство, представляющееся мне очень важным, которое, насколько я знаю, еще не привлекало ничьего внимания. Двигательные нервы имеют общий центр с ощущающими нервными корнями, снабженными ганглиями, *sensorium commune*, и все это устроено таким образом, что любое состояние освобождающего аппарата является решающим для общего самочувствия и общего состояния организма. Приятное ощущение здоровья указывает на нормальное, ничем не нарушенное, состояние аппарата освобождения, между тем как, наоборот, всякое расстройство последнего дает себя знать

32 БИОГРАФИЯ МАЙЕРА

при посредстве очень неприятных ощущений. Итак, в общем, имеет силу закон, что правильные физиологические освобождения, поскольку, конечно, они не переходят известных границ, вызывают в нас приятные ощущения. На этом именно и основано множество удовольствий, например: прогулки, пение, танцы, плавание, катанье на коньках и еще многое подобное... Источником приятного самочувствия и радости бывают не только внутренние физиологические освобождения; человеку доставляет удовольствие вызывать и внешние освобождения. Человек по своей природе так устроен, что он любит, применяя незначительные средства, достигать больших результатов. Удовольствие, испытываемое при стрельбе из огнестрельного оружия, свидетельствует об этом очень наглядно... Управление лошадью при езде верхом и в экипаже относится к тому же разряду явлений и т. д. Но если вызывание освобождений является неисчерпаемым источником дозволенных радостей и безобидных удовольствий, то следует, однако, отметить, что это же явление очень часто, к сожалению, приводит к безобразнейшим действиям и наказуемым преступлениям. В основе покушений, как общее правило, лежит, без сомнения, стремление добиться каких-нибудь значительных результатов, т. е. достичь возможно более сильных освобождений. Так именно обстоит дело с поджогами или страшными попытками вызвать гибель целых поездов с помощью каменных глыб, положенных на рельсы. Да если бы наша планета была создана таким образом, что каждый желающий мог бы ее взорвать, как какой-нибудь сосуд с динамитом, то, несомненно, всегда нашлись бы люди, готовые даже ценою собственной жизни добиться того, чтобы наша прекрасная земля взорвалась и разлетелась на куски в мировом пространстве».

Майер¹ охватил свою задачу настолько широко, насколько это было возможно. Он настолько выяснил, очистил и ограничил понятие о силе, что закон сохранения силы вытекал из него, как основная

¹ Julius Robert Mayer, родился 25 ноября 1814 г. в Гейльбронне, где его отец, после долгого пребывания в Швейцарии и в различных других странах, поселился в качестве аптекаря. Брат Роберта, старше его на много лет, взял на себя ведение аптеки, а он сам с 1832 г. стал изучать медицину в Тюбингене, а затем, оставив этот университет не без содействия академического совета, продолжал свои занятия в Мюнхене и Вене. По совету своего отца, желавшего, чтобы сын его повидал свет, Роберт по окончании медицинского образования поступил на службу в Голландии и отправился в качестве корабельного врача на о. Яву. Там, согласно собственным его словам, в 1840 г., изменение цвета венозной крови навело его на мысль, что в человеческом организме должна существовать прямая связь между потреблением вещества и образованием тепла. В 1812 г., в котором он опубликовал основы своих новых воззрений на силу, он приступил к устройству своего собственного домашнего очага. Но вскоре на его голову посыпались беды, достигшие своего апогея в форме продолжительного и, как говорят, не вполне добровольного пребывания в лечебнице для умалишенных. Этот период бедствий продолжался до конца пятидесятых годов, когда в ученом мире заслуги Майера получили признание и все близкие к нему убедились в его умственном здоровье и большом значении его работ. Еще в 1851 г. в „Архиве“ Фирордта появилась его маленькая статья „О деятельности сердца“, но затем наступил перерыв, продолжавшийся более 10 лет. В 1862 г. Майер снова возобновил свои исследования, поместив в „Archiv der Heilkunde“ Вундерлиха статью „О лихорадке“; но в течение этого длитель-

33 ОЦЕНКА ЗАСЛУГ МАЙЕРА

аксиома физики, которая, будучи достоверной сама по себе, не требовали уже дальнейших доказательств. Только для того, чтобы представить этот закон более наглядно, он сначала установил закон сохранения силы при переходе теплоты в механическую работу, а потом рассмотрел и другие встречающиеся в природе случаи превращения сил. Правда, по условиям своей жизни он не имел возможности производить собственных опытов и измерений, но зато он воспользовался, — и это мы должны определенно констатировать, — с большим искусством и знанием дела лучшими имевшимися в то время измерениями. Далее, ему первому на этом пути удалось установить отношение между теплотой и механической силой при их превращениях — с такой точностью, какая только тогда была возможна. Для остальных сил он этого, конечно, не сделал, за отсутствием соответствующих подготовительных работ и соответствующей системы мер. Он мог показать только качественно, что повсюду в природе всякому возникновению силы соответствует затрата силы; и в этом смысле он с большой полнотой и знанием дела вскрыл почти все источники сил в природе, — даже там, где они, несмотря на значительность порождаемых ими сил, казались скрытыми. Едва ли, впрочем, можно сомневаться в том, что работа Майера требовала дополнения, что закон сохранения силы должен был быть твердо установлен с количественной стороны для всех вообще воз-

ного перерыва развитие, а также применение основного закона сохранения силы и выросшего на его идеях нового учения о теплоте зашло так далеко, что у него уже не было сил, а может быть, и желания, продолжать активную научную работу в этой области. Все последующие работы Майера либо являются популярными изложениями, либо содержат в себе общие краткие указания на возможные дальнейшие обобщения или имеющиеся пробелы в воззрениях по вопросу о сохранении силы. В 1869 г., на собрании натуралистов в Инсбруке он прочитал доклад „Über die nothwendigen Consequenzen und Inconsequenzen der mechanischen Wärmetheorie" („О необходимых следствиях и непоследовательностях механической теории теплоты"), в котором он отмечает, что к духовному миру закон сохранения силы не применим в том же смысле, как к миру материальному; хотя все виды духовной деятельности и неразрывно связаны с молекулярными процессами в мозгу, но они с ними не совпадают полностью, все равно, как нельзя, например, рассматривать телеграфную депешу как простую функцию электрохимической деятельности, порождающей ток. В 1870 г., в Ульме, выступив с докладом „О землетрясениях", Майер остановился на теории Кордье, согласно которой землетрясения обуславливаются сжатием земной коры и ее давлением на внутренность планеты; защищая эту теорию, он выступил с новыми аргументами против старых возражений. В том же году он выступил в Гейльбронне с докладом на тему „О значении неизменяемых величин", а три года спустя „О переменных величинах". Лебединою песнью Майера были значительные и широкие по своему охвату работы „О торичеллиевой пустоте" и „Об Освобождении сил" (1876 г.); о последней работе было уже упомянуто выше. Он умер в марте 1878 г. в Гейльбронне от скоротечного воспаления легких. Его глубокую убежденную религиозность и идеальный взгляд на жизнь, устоявший вопреки жизненным невзгодам, лучше всего характеризуют заключительные слова одной из популярных лекций, прочитанных им в 1871 г.: „В новейшее время, как вы знаете, потребность в пище хотели возвести в принцип под названием „борьбы за существование" и благодаря этому пришли к совершенно односторонним выводам. Подобная „борьба за существование", конечно, существует; но не голод, не война и не ненависть поддерживают мир, его поддерживает любовь" („Mechanik der Wärme", стр. 396, Stuttgart 1874).

34 ОБРАЗОВАНИЕ ТЕПЛА ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ТОКЕ

возможных в природе случаев превращения силы, что раньше, чем этот закон мог быть признан непреложной физической истиной, следовало, в противоположность Майеру и дополняя его, привести доказательство этого закона, исходя из частных явлений и восходя затем к общему. Легко также понять, что этот последний путь должен был представляться физикам и более надежным и более понятным, чем первый путь. Этим именно вторым путем и пошел тотчас после появления первой работы Майера, но независимо от него, английский физик *Джеймс Прескотт* Джоуль. Его первая работа по этому вопросу, озаглавленная «*On the Calorific Effects of Magneto-Electricity and the mechanical Value of Heat*» («О тепловом эффекте магнитоэлектричества и механическом значении теплоты»), была им доложена 21 августа 1843 г. физико-математической секции Британской ассоциации в Корке¹.

Занимаясь уже в течение довольно долгого времени исследованием процесса образования тепла при электрическом токе, Джоуль объяснял эту теплоту химическими превращениями, происходящими в батарее, и к той же причине сводил «скрытую» теплоту при электролизе воды². Поэтому, когда перед ним теперь встал вопрос, откуда берется теплота в соединительном проводе при прохождении через него магнитоэлектрического тока, — *возникает ли* она здесь впервые или же она только *переносится* из одной части прибора в другую, то под влиянием вышеупомянутых своих исследований он стал склоняться в сторону второго мнения, тем более что открытое в то время Пельтье явление образования холода при прохождении электрического тока говорило, по-видимому, тоже в пользу этого мнения. Для того чтобы разрешить вопрос, какая из этих двух возможных точек зрения является правильной, Джоуль поместил в стеклянный сосуд с водою небольшой электромагнит и, плотно закупорив этот сосуд, привел его в быстрое вращательное движение между полюсами сильного неподвижного электромагнита, соединенного с гальванической батареей. Для того чтобы иметь возможность определить интенсивности возникающих при этом индуцированных токов, концы соответствующих проводов были присоединены к очень чувствительному гальванометру. Вращение подвижного электромагнита производилось со скоростью 600 оборотов в минуту, причем попеременно четверть часа при замкнутой цепи тока и четверть часа — при разомкнутой. Так как и при последних условиях, обычно получалось некоторое количество теплоты, то Джоуль вычитал его из тепла, получавшегося в первом случае, и таким образом определял количество теплоты, действительно выделенной индуцированным электричеством. Сопоставление нижесле-

¹ Напечатано в „Philosophical Magazine“ (3), XXIII, стр. 263, 347, 435, 1843 г. переведено на немецкий язык Шпенгелем в его работе „Das mechanische Wärmeäquivalent“ стр. 1—40, Braunschweig 1872.

² „Philosophical Magazine“ (3), XIX, стр. 260, 1841: „On the Heat evolved Metallic Conductors of Electricity, and in the Cells of a Battery during Electrolysis“ „Memoirs of the Lit. and Phil. Soc. of Manchester“ (2), VII, стр. 87, 1846: „On the Heat evolved by Electrolysis of Water“ (доложено 24 янв. 1843 г.); напечатано в „Das mechanische Wärmeäquivalent“, Braunschweig 1872, стр. 41—55.

ДЖОУЛЬ ОПРЕДЕЛЯЕТ МЕХАНИЧЕСКИЙ ЭКВИВАЛЕНТ ТЕПЛОТЫ 35

дующих средних результатов, полученных им из шести рядов опытов, позволило ему установить следующий названный по его имени закон:

№ ряда опытов	Магнито-электрические единицы тока	Квадраты чисел, пропорциональных числам предшествующего столбца	Корригированное количество теплоты	№ ряда опытов	Магнито-электрические единицы тока	Квадраты чисел, пропорциональных числам предшествующего столбца	Корригированное количество теплоты
1	0,177	0,062	0,08	4	1,019	2,060	2,11
2	0,902	1,614	1,56	5	0,236	0,109	0,10
3	0,418	0,346	0,36	6	0,340	0,229	0,21

Теплота, развиваемая благодаря действию магнитоэлектрических машин (ceteris paribus, т. е. при прочих равных условиях), пропорциональна квадрату силы тока.

Результаты этих опытов сделали совершенно невозможной идею о простом переносе тепла электрическим током. Кроме того, Джоуль заметил, что теплоту, развиваемую в цепи гальваническим током, он мог по желанию усиливать и ослаблять при помощи магнитоэлектрических токов; отсюда он сделал общее заключение, что теплоту можно *уничтожить* или *развивать* и с помощью механических сил, если только применить для этого магнитоэлектричество в качестве посредствующей силы.

При помощи машины Джоуля теперь было также очень легко определить, *в каком отношении механическая сила, приводящая во вращение электромагнит, превращается в теплоту.* Джоулю нужно было только непосредственное вращение электромагнита от руки заменить вращением при помощи падающего груза, чтобы таким образом прямо определить величину механической работы, необходимой для получения определенного количества теплоты. Таким именно путем он получил следующий средний результат:

«Количество тепла, которое в состоянии нагреть 1 фун. воды на 1 ° F, равно и может быть превращено в механическую силу, которая в состоянии поднять 838 фун. на вертикальную высоту в 1 фут»².

Этот вывод Джоуль сопровождает только двумя замечаниями: первое гласит, что лучшие паровые машины дают лишь десятую часть той работы, которую мог бы дать сжигаемый в них уголь, а второе, что, тем не менее, электромагнитные машины, приводимые в движение каком-либо из применяемых ныне батарей, никогда не могут превзойти паровых машин в экономическом отношении.

¹ „Das mechanische Wärmeäquivalent“, стр. 14, Braunschweig 1872.

² На наши единицы это составляет 460 кгм. Отдельные результаты, конечно, еще очень сильно отклонялись от среднего — настолько, что наибольший составил 1026 футофун., а наименьший — 587 футофун.

36 ПЕРВЫЕ МЫСЛИ ДЖОУЛЯ О СОХРАНЕНИИ СИЛЫ

В постскриптуме ¹ от августа 1843 г., помещенном в этой же работе, датированной июлем, он, зато идет гораздо дальше и вкратце развивает идеи, которые по своей смелости почти «приближаются к идеям Майера 1845 г. и убедительным образом свидетельствуют о *независимости хода мыслей Джоуля* от предшествующих работ Майера. В своих работах Джоуль видит ясное доказательство того, что теплота, выделяющаяся при сверлении пушечных стволов, приведшая Румфорда к его кинетической теории теплоты, возникает вследствие трения, а не вследствие уменьшения теплоемкости металла. Для того чтобы подкрепить эту мысль, он также привел в движение поршень с пробурованными отверстиями в сосуде с водой и отсюда определил механический эквивалент равным 770 футофун. (423 кгм). В том же постскриптуме он обещает в ближайшем времени повторить и расширить свои опыты, будучи убежден, *«что могучие силы природы, созданные велением творца, неразрушимы и что во всех случаях, когда затрачивается механическая сила, получается точное эквивалентное количество теплоты»*. Он также утверждает, что *животная теплота* возникает вследствие химических превращений, происходящих в теле, и полагает, что при механической работе, например при вращении машины или при восхождении на гору, должно иметь место соответствующее уменьшение количеств тепла, образующегося в теле. Наконец,— и это является наиболее глубокой из его идей, — он утверждает, что *сила химического сродства определяется «падением атомов»*. Он исчисляет, например, что 8 фун. кислорода и 1 фун. водорода, взятые в газообразном состоянии, соединяясь со взрывом, способны нагреть 60 000 фун. воды на 1° F или поднять на высоту 1 фут. груз в 50 000 000 фун., и полагает, что те же вещества, будучи соединены в жидком состоянии, дали бы меньше тепла, *«так как при своем соединении атомы пробежали бы меньшие пути»*.

Дальнейшая очень интенсивная работа Джоуля была направлена; к тому, чтобы на самых разнообразных случаях превращения механической силы в теплоту индуктивно доказать постоянство отношения их превращения и определить величину последнего с максимальной возможной точностью. С этой целью он в 1845 г. опубликовал новую работу *«On the Changes of Temperatur produced by the Rarefaction and Condensation of Air»* ² («Об изменениях температуры, вызванных разрежением и сгущением воздуха»). Здесь описан следующий опыт: нагнетательный насос вместе с приемником был погружен в резервуар с водой; затем воздух в приемнике сжимался до 22 ат и измерялась выделяющаяся при этом теплота. Эти опыты, интересные также с точки зрения экспериментальной техники, как по принятым здесь мерам предосторожности (для обеспечения постоянства температуры поступающего внутрь воздуха), так и по необходимым поправкам (на трение поршня и на теплоту, возникающую при перемешивании воды), дали для теплового эквивалента величину в 795 футо-

¹ „Das mechanische Wärmeäquivalent“, стр. 38, Braunschweig 1872.

² „Philosophical Magazine“ (3), XXVI, стр. 369; „Das mechanische Wärmeäquivalent“, стр. 56, Braunschweig 1872.

ОПЫТЫ ДЖОУЛЯ НАД СЖАТИЕМ ВОЗДУХА 37

фун. (436 кгм). Из хорошего соответствия этого числа полученным раньше данным Джоуль снова сделал тот вывод, *что образовавшаяся теплота есть не что иное, как иная форма проявления механической силы, примененной при сжатии воздуха.*

Дальнейшие опыты только укрепили его в этом воззрении. Джоуль соединил два равных приемника трубкой и в одном из них воздух сжал до 22 ат, а из другого воздух выкачал. Когда затем он поместил оба приемника в сосуд с водой и сообщил между собой оба приемника так, что воздух мог свободно перейти из одного в другой, то температура воды *не изменилась*. Но когда приемники были помещены в отдельные сосуды с водою, то при перетекании воздуха в одном сосуде произошло охлаждение на 2°,36, а в другом нагревание на 2°,38 на каждый фунт воды. Далее, с целью точного измерения, приемник со сжатым воздухом был помещен в сосуд с водою и воздух из приемника выпускался через пневматическую ванну в другой сосуд, где количество поступающего воздуха могло быть легко измерено. Из различных рядов подобных опытов Джоуль получил механический эквивалент в 823, 795, 820, 814 и 760 футофун., причем среднее из трех последних чисел, или 798 футофун. (438 кгм), Джоуль признал наиболее надежным. Кроме того, эти результаты подтвердили важное открытие Дюлонга, который показал, что когда равные объемы газов, при равных температурах и одинаковых давлениях, внезапно сжимаются или расширяются на одну и ту же долю своего объема, то они выделяют или поглощают равные абсолютно количества теплоты. *Но приведенный выше опыт, при котором, несмотря на расширение воздуха до двойного его объема, не произошло никакого охлаждения, Джоуль рассматривает как вернейшее доказательство того, что теплоту следует считать не веществом, а движением составных частей тела.* Наряду с этими воззрениями на новую теорию теплоты, к которым мы еще вернемся, Джоуль снова высказывает свое твердое убеждение в абсолютной правильности закона сохранения силы. Он убежден, что теория Карно, допускающая получение механической работы за счет теплового тока, противоречит истине, так как она приводит к выводу, что при нецелесообразном устройстве паровых машин может иметь место уничтожение живой силы. Полагая, *«что мощью разрушать обладает лишь творец»*, он соглашается *«с Фарадеем и Роже в том, что всякая теория, приводящая в своих последствиях к возможности уничтожению сил, по необходимости не верна»*¹.

В 1845 г. в письме к издателям журнала *«Philosophical Magazine»* Джоуль опять описывает свои новые опыты². Приводя со вращение горизонтально помещенное в сосуде с водою колесо с черпаками, он из этого опыта исчислил механический эквивалент теплоты в 890 футофун. (489 кгм). Из тепла, которое развивает вода при протекании через узкие трубки, та же величина определилась

¹ „Das mechanische Wärmeäquivalent“, стр. 75.

² „Philosophical Magazine“ (3), XXVII, стр. 205—207; „Das mechanische Wärmeäquivalent“, стр. 77.

38 ГЛАВНАЯ РАБОТА ДЖОУЛЯ (1850 г.)

в 774 футофун. (424 кгм). Теперь Джоуль считал наиболее правильным числом 817 футофун. (448 кгм).

После того как в работе 1847 г.¹ он снова описал свои опыты с горизонтальным колесом, которые дали в среднем эквивалент в 781,8 футофун. (429 кгм), он в 1850 г. пришел к наиболее точным измерениям, а вместе с тем создал свою *главную работу*, в которой он сопоставил все полученные им до того времени результаты². Вслед за историческим введением он дает описание пяти рядов произведенных им опытов. В первом из них, наиболее обширном, опыты производились с плотно закупоривающимся медным цилиндром с водою, в котором вращалось медное колесо с черпаками. Во втором и третьем рядах опытов аналогичный цилиндр был чугунный, а жидкостью служила ртуть, колесо же было сделано из кованого железа. В обоих рядах этих опытов, с целью по возможности воспрепятствовать перемещению самой жидкости, на внутренней поверхности цилиндров были устроены радиально перегородки с прорезами для лопаток колеса. В четвертом и пятом рядах опытов теплота получалась в чугунном резервуаре со ртутью благодаря трению чугунного диска, укрепленного на подвижной оси, по такому же диску, укрепленному свинцовыми грузами. Результаты всех этих опытов, с поправками на все возможные возмущающие явления, были составлены Джоулем в следующей таблице:

№ ряда опытов	Примененный материал	Эквивалент в воздухе	Эквивалент в пустоте	Средняя величина
1	Вода	773,640	772,692	772,692
2	Ртуть	773,762	772,814	774,083
3	Ртуть	776,303	775,352	
4	Чугун	776,997	776,045	774,987 ³
5	Чугун	774,880	773,930	

Это сочинение, а вместе с тем и свои специальные исследования по вопросу о механическом эквиваленте тепла Джоуль заканчивает следующими словами: «В высшей степени вероятно, что эквивалент, полученный по чугуну, получился несколько выше потому, что при трении отрывались частицы металла и, следовательно, некоторая часть силы шла на преодоление сцепления. Но так как количество это было не настолько велико, чтобы его можно было по окончании опыта взвесить, то связанная с ним ошибка незначительна. По моему мнению, число 772,692, полученное из трения воды, является наи-

¹ „Philosophical Magazine" (3), XXXI, стр. 173, „Das mechanische Wärmeäquivalent", стр. 81; „Pogg. Ann.", LXXIII, 479.

² „Phil. Trans.", стр. 61, 1850; „Das mechanische Wärmeäquivalent", стр. 87; „Pogg. Ann.", дополнительный том IV, стр. 601.

³ „Das mechanische Wärmeäquivalent", стр. 118.

ОПЫТЫ ДЖОУЛЯ НАД ТРЕНИЕМ 39

более точным как вследствие большого числа опытов, так и вследствие значительной теплоемкости аппарата. А так как даже при опытах с жидкостями невозможно устранить полностью ни сотрясений, ни хотя бы тихих звуков, то приведенное число, вероятно, еще несколько велико. Поэтому я прихожу к заключению, что на основании приведенных в настоящей работе опытов можно считать доказанным: 1) что теплота, развивающаяся при трении тел, будь то тела твердые или жидкие, всегда пропорциональна примененной силе и 2) что для получения количества тепла, которое в состоянии нагреть 1 фун. воды (взвешенного в пустоте и между 55° и 60° F) на 1° F, необходимо употребить механическую силу, которая может быть представлена падением 772 фун. с высоты 1 фут.» (424 кгм для 1° C)¹. В работах Джоуля эквивалентность теплоты и механической работы стоит на первом плане; наибольшие усилия его направлены к тому, чтобы доказать эту эквивалентность и дать возможно более точное количественное определение этого отношения. Теория теплоты как движения стоит у него уже на втором плане, а общая проблема, закон сохранения силы, — на последнем. Это не значит, что Джоуль был меньше уверен в правильности этого закона, чем Майер, или что он представлял его себе в менее общем виде, чем последний; но его как экспериментатора меньше интересовала принципиальная сторона этого закона, его философское обоснование, равно как вопрос о его всеобщей применимости ко всем явлениям природы. В этом отношении Джоуль представляет собою прямую противоположность Майеру. В то время как последний обращается прежде всего, к вопросу о принципиальной возможности закона и дедуктивно обосновывает применимость его ко всем явлениям природы, пользуясь

¹ Позднее Джоуль еще раз вернулся к своим измерениям. Комитет британского общества натуралистов высказал пожелание, чтобы при установлении основной меры для электрического сопротивления было вновь произведено определение механического эквивалента теплоты из наблюдения над теплотой, развивающейся в цепи электрического тока, — с тем, чтобы при этом исследовании была применена предложенная комитетом абсолютная единица сопротивления. Джоуль произвел эти измерения, причем получил для механического эквивалента теплоты значение 782,5 футофун. („Rep. of the Brit. Ass.", Dundee; стр. 522, 1867). Ввиду расхождения этого результата с ранее полученными значениями собрание упомянутого общества в 1870 г. выделило специальный новый комитет для проведения этих измерений, в состав которого вошли У. Томсон, Р. Тэт, Клерк Максвелл, В. Стюарт и Джоуль. Эти опыты были произведены последним на средства комитета по прежнему более прямому способу, причем механический эквивалент теплоты определился в 772,43 футофун. (соответственно количеству тепла, которое в состоянии нагреть фунт воды, взвешенной в пустоте от 60° до 61° F) („Phil. Trans.", стр. 365, 1878). У. Томсон отмечает по этому поводу („Heat", стр. 35, Edinburgh 1880): „На основании измерений теплоемкости воды, произведенных Реньо при различных температурах от 0° до 230° C. Эта величина при 60° F должна быть приблизительно на 0,08% выше, чем при 32° F. Поэтому термодинамический результат Джоуля для работы нагревания 1 фун. воды от 32 до 33° F должен был бы быть равным 771,81 футофун. В Париже тяжесть приблизительно на 4% ниже, чем в Манчестере. В силу этого для средней Франции и для юга Германии этот результат Джоуля следует принять равным 423,5 кгм (соответственно количеству тепла, которое может нагреть 1 кг воды от 0° до 1° C)".

40 ДЖОУЛЬ И МАЙЕР

эмпирическими определениями только для иллюстрации, — поскольку это позволял имеющийся наличный материал наблюдения, — Джоуль старается доказать этот закон путем самых тщательных опытных определений для двух наиболее распространенных в природе сил — для тепла и механической работы, — и найденный им здесь закон он распространяет на прочие явления природы лишь мимоходом, как нечто само собою разумеющееся. Таким образом, оба они, натурфилософ и эмпирик, идут к одной и той же цели, независимо друг от друга, каждый не вполне односторонне, т. е. не упуская вполне из виду и противоположной стороны, и отличаясь друг от друга лишь тем, что у одного из них преобладает дедукция, а у другого индукция. Поэтому и спор о том, кого из них обоих следует считать настоящим, бо́льшим творцом закона, не имеет смысла и сводится, в конце концов, не к оценке обеих гениальных личностей, а к сравнению двух методов физики — натурфилософского и экспериментального, — сравнению, которое, если даже отвлечься от одностороннего интереса арбитров, ни к чему привести не может, так как эти методы как несоизмеримые величины, покоящиеся на совершенно различных единицах измерения, не поддаются сравнению¹.

Если сказать, что введение в физику такого основного и всеобщего закона, как закон сохранения силы, потребовало совместного усилия всех трех методов физики — умозрения, опыта и математического анализа, — то это может показаться произвольным утверждением, сделанным в угоду предвзятой схеме; а между тем, так оно и было в действительности.

Наряду с Майером, обосновавшим этот закон с точки зрения теории познания, и Джоулем, доказавшим его чисто опытным путем, потребовалась еще работа математика со свойственными ему приемами исследования. Основание такому изучению закона с математической точки зрения, правда, незавершенному еще и

¹ James Prescott Joule родился 24 декабря 1818 г. в Сальфорде близ Манчестера; был владельцем большого пивоваренного завода. С ранних лет занимался электромагнитными исследованиями и устройством приборов, которые, начиная с 1838 г., он описывал в журнале „Sturgeon's Annals of Electricity“. Эти занятия навели его на проблему об отношении между силами, вызывающими электричество, и теплотой, развиваемой ими в цепи тока. Проведенные им измерения механического эквивалента теплоты при посредстве наблюдений над разрежением и сжатием газов привели его к исследованию *внутренней работы газов*. Последние дали для воздуха и для так называемых постоянных газов столь ничтожные величины внутренней работы по сравнению с внешней, что величины механического эквивалента теплоты, выведенные из изменения состояния подобных газов, можно было считать вполне точными и для постоянных газов внутреннюю работу можно было признать равной нулю. Впоследствии Джоуль совместно с У. Томсоном исследовали отклонения газов от этого идеального состояния и работы свои опубликовали в ряде статей, очень важных для теории теплоты („Phil. Trans.“, стр. 357, 1853; там же, стр. 321, 1854; там же, стр. 579, 1862). *Джоуль вообще всегда очень скуп на изложение своих общих теоретических соображений; но об их гениальности свидетельствуют его приемы, постановка и проведение его экспериментальных исследований. Во всяком случае, правильнее будет приписать кажущуюся односторонность Джоуля как физика-экспериментатора скорее его способу изложения, чем его идеям.*

БИОГРАФИЯ ГЕЛЬМГОЛЬЦА 41

до сих пор, положил Г. Гельмгольц в 1847 г. своей работой «Über die Erhaltung der Kraft» («О сохранении силы») ¹.

Работа эта, по самой природе вещей, стоит ближе к исследованиям Майера, чем к работам Джоуля. Натурфилософия и математика как дедуктивные науки исходят из общих принципов и стараются охватить ими все случаи, тогда как эмпирик, имея в виду лишь начало пути, может и не думать о том, что лежит в его конце. Гельмгольц подходит к вопросу с физико-математической точки зрения правильно, рассматривая закон сохранения силы как гипотезу, допустимую с точки зрения природы нашей познавательной способности; затем он отсюда математически выводит частные количественные законы действия для всех отдельных явлений природы и далее смотрит, насколько отдельные силы природы удовлетворяют выведенным законам или насколько опыты им противоречат, одним словом, — в какой мере основное начало подтверждается опытом.

Основное положение, что для каждого изменения в природе должна существовать достаточная причина, побуждает нас, — говорит Гельмгольц, — искать неизвестные причины процессов в видимых проявлениях последних. «Ближайшие причины, которые мы кладем в основание явлений природы, сами по себе могут быть неизменными или же изменчивыми; в последнем случае то же основное положение побуждает нас опять-таки искать причины этой изменчивости. Продолжая таким образом, мы доходим, наконец, до *последних причин*, которые действуют по *неизменному* закону, т. е. которые во всякое время, при одних и тех же внешних отношениях, вызывают одно и то же действие. Таким образом, конечной целью теоретических наук о природе должно быть открытие последних неизменных причин явлений природы». Если, согласно сказанному, представить себе мир разложенным на элементы с неизменными силами (неизменными качествами), то *«единственно еще возможными изменениями в такой системе будут изменения пространственные, т. е. движения; а внешними отношениями, под влиянием которых видоизменяется действие сил, могут быть также только пространственные; следовательно, силами будут только силы движения, зависящие в своем действии только от пространственных отношений»*. «Но сила, действующая между

¹ Доложена в заседании Физического общества в Берлине 23 июля 1847 г.; отдельной книгой вышла у G. Reimer, Берлин 1847, повторно напечатана в „Wissenschaftliche Abhandlungen“ Гельмгольца, 1, стр. 12—75, Leipzig 1882. Следует также обратить внимание на собственный реферат Гельмгольца в журнале „Die „Fortschritte der Physik“, издающемся Берлинским физическим обществом, т. III, 1847, стр. 232—245.

Hermann Ludwig Ferdinand v. Helmholtz, сын учителя гимназии, род. в Потсдаме 31 августа 1821 г., умер в 1894 г. С 1838 г. изучал медицину в Берлине; в 1842 г. был ординатором в Charité; в 1843 г. военным врачом в Потсдаме; в 1848 г. преподавателем анатомии в Берлинской академии художеств; в 1849 г. профессором физиологии в Кенигсберге; в 1855 г. — в Бонне; в 1858 г. в Гейдельберге; в 1871 г. профессором физики в Берлине. В последнее время состоял директором Физико-технического института в Берлине. Его труды, рассеянные в журналах, собраны в „Wissenschaftliche Abhandlungen“, 2 тома, Leipzig 1882—1883; популярные его статьи собраны в издании „Vorträge und Reden“, 3 изд., 2 т. Braunschweig 1884.

42 ЖИВАЯ СИЛА И СИЛА НАПРЯЖЕНИЯ

двумя целыми массами, должна быть разложена на силы, действующие между всеми их частями; поэтому механика обращается к силам материальных точек, т. е. точек пространства, заполненного материей. Но между точками нет иных взаимных пространственных отношений, кроме их расстояния, так как направление соединяющей их линии может быть определено не иначе, как в отношении, по крайней мере, к еще двум другим точкам. Поэтому сила движения между двумя точками может быть также только причиной изменения их взаимного расстояния, т. е. быть силой притяжения или отталкивания. Это следует также прямо из закона достаточного основания. Силы, действующие между двумя массами, необходимо должны быть определены по своей величине и направлению, как только положение масс полностью дано. Но две точки определяют вполне только одно направление, а именно — направление соединяющей их линии; следовательно, силы, действующие между точками, должны быть направлены по этой прямой и их интенсивность должна зависеть только от расстояния. *Таким образом, окончательно задача физических наук о природе заключается в том, чтобы явления природы свести к неизменным притягательным и отталкивательным силам, величина которых зависит от расстояния.*

Неизменяемость этих сил, равно как и самые силы, может быть познана только путем построения гипотез, а не непосредственно: о ней можно судить только по действиям сил. Последние бывают двух родов. Силы притяжения и отталкивания, действуя между элементами, могут либо действительно приводить последние в движение, развивая, таким образом, некоторую «живую силу», либо они создают между элементами только известное *напряжение*. Живая сила элемента измеряется mv^2 , или, еще лучше, как предлагает Гельмгольц, $\frac{1}{2}mv^2$. Сумма же всех сил напряжения, действующих на данном участке, может быть выражена величиною площади кривой напряжения. Эта кривая получается, если величины сил, действующих в отдельных точках отрезка, отложить в качестве ординат на этом отрезке; тогда сумма сил напряжения будет равна

$$\int_r^R \varphi dr,$$

где φ обозначает интенсивность силы в каждой точке, а R и r расстояния начальной и конечной точек отрезка от некоторой неподвижной точки. Для системы материальных точек, подверженных действию только таких сил, в направлении которых лежат линии соединения точек, и интенсивность которых зависит только от взаимного расстояния последних, Гельмгольц легко приходит к следующему уравнению:

$$-\sum \left[\int_{r_{ab}}^{R_{ab}} \varphi_{ab} dr_{ab} \right] = \sum \left[\frac{1}{2} m_a V_a^2 \right] - \sum \left[\frac{1}{2} m_a v_a^2 \right],$$

выражающему принцип сохранения силы в самом общем виде. В словесной форме последний формулируется следующим образом: «Во всех случаях движения свободных материальных точек под влиянием их притягательных и отталкивательных сил, интенсивность которых за-

ФОРМУЛА ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ СИЛЫ 43

висит только от расстояния, потеря в количестве силы напряжения всегда равна приращению живой силы, а приращение первой — потере второй. Следовательно, сумма всех живых сил и сил напряжения является всегда величиной постоянной».

Результаты своих исследований Гельмгольц резюмирует в следующих положениях: «1) Всякий раз, когда тела природы действуют друг на друга под влиянием их притягательных или отталкивательных сил, не зависящих ни от времени, ни от скоростей, сумма сил напряжения и живых сил в системе должна оставаться постоянной, и, следовательно, максимум работы, которая может быть получена, является величиной определенной, конечной. 2) Если же между телами действуют силы, зависящие от скоростей и времени или действующие по направлениям, не совпадающим с прямыми, соединяющими попарно деятельные материальные точки — например, силы вращательные, то возможны такие сочетания этих тел, при которых сила либо теряется, либо выигрывается до бесконечности. 3) При равновесии системы тел под действием центральных сил внутренние и внешние силы должны взаимно уравновешиваться, если только мы примем, что тела системы связаны между собою неподвижно и что только вся система в целом может перемещаться относительно вне ее лежащих тел. Следовательно, твердая система подобных тел никогда не может быть приведена в движение под действием внутренних сил, а только под влиянием внешних сил. Если бы, значит, существовали другие силы, кроме центральных, то можно было бы создавать такие прочные соединения тел природы, которые двигались бы сами собою, не нуждаясь в какой-либо связи с другими телами».

Эти общие положения о природе сил, удовлетворяющих принципу сохранения силы, принадлежат к наиболее спорным во всей этой области. Из убеждений о невозможности *perpetuum mobile* (вечного двигателя), доказанного индуктивно опытным путем или выведенного дедуктивно из условий нашего познания, с необходимостью вытекает обязательность принципа сохранения силы для всех явлений природы¹. Тем самым вышеприведенные положения признают невозможность существования в природе каких-либо иных сил, кроме живых или центральных. Но вот еще за год до появления данной работы Гельмгольца В. Вебер пришел к выводу, что силы, с которыми действуют друг на друга движущиеся частицы электричества, зависят не только от их

¹ В сочинении 1847 г. Гельмгольц утверждает невозможность *perpetuum mobile*, не исследуя, на чем основано это допущение („Erhaltung der Kraft", стр. 7 и 8). В 1882 г., в особом прибавлении к этой работе, он характеризует вышеуказанную невозможность как *чисто опытный факт*: „невозможность построения какого бы то ни было *perpetuum mobile*, т. е. получения без конца движущей силы без соответствующей затраты была, постепенно обретенной индукцией, вытекшей из многих тщетных попыток его осуществления. Французская академия уже давно отнесла *perpetuum mobile* к той же категории, что и квадратуру круга, постановив не принимать к рассмотрению мнимых решений этой проблемы. Это следует рассматривать как выражение убеждения, широко распространенного между специалистами" („Wissenschaftl. Abhandlungen", I, стр. 73—74). Впрочем, по нашему мнению, широко распространенное в среде физиков убеждение не является еще достаточной основой для естественного закона.

44 РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗАКОНА НА СТЕРЖНЕВЫЕ СИЛЫ

взаимных расстояний, но также от их скоростей и даже от их ускорений ¹. Следовательно, по Гельмгольцу такие электродинамические силы не должны были бы подпадать под действие закона сохранения силы и допускали бы такие сочетания, при которых возможны как потеря, так и выигрыш силы до бесконечности. Но вскоре затем Вебер показал ², что и принятые им силы имеют потенциал, представляют, следовательно, во всех случаях определенное количество работы и удовлетворяют, таким образом, принципу сохранения силы. Позднее и Клаузиус, подобно Веберу, принял зависимость электродинамических сил от скорости и тем самым тоже перешел через границы, проведенные Гельмгольцем. Наконец, в новейшее время Вейраух пришел к выводу, что и в теории упругости твердых тел одного допущения центральных сил недостаточно для объяснения явлений. Подобные силы, действующие между двумя частицами массы по прямой, соединяющей последние, но зависящие не только от расстояния между частицами, но также и от их движения, он называет *стержневыми*. Исследование этих сил приводит его к положению, что и к ним применим закон сохранения энергии, если только работа действующих сил в определенный момент вообще выражается полным дифференциалом, хотя бы это не был полный дифференциал чистой функции координат, т. е. если Sdl (где S обозначает действующие стержневые силы, l — расстояние между частицами масс) есть вообще полный дифференциал какой-либо функции ³. Позднее, в прибавлениях к своей работе, Гельмгольц определенно отмечает, что данное им доказательство принципа сохранения силы, ограничивавшее его применимость одними центральными силами, было слишком узко и что, следовательно, второе из вышеприведенных его положений было сформулировано слишком широко. Вот его собственные слова по поводу этого положения ⁴: «Это положение сформулировано тоже слишком широко, так как мы вынуждены ограничить предшествующие общие положения случаями, для которых имеет место равенство действия и противодействия. Но если мы последнее отбросим, то установленный недавно Клаузиусом основной электродинамический закон представляет собою случай, когда силы, зависящие от скоростей и ускорений, все-таки не могут порождать движущих сил до бесконечности».

Вслед за общим рассмотрением принципа сохранения силы Гельмгольц обращается к специальным применениям и вместе с тем к проверке этого закона на частных случаях. Этот закон был признан и применялся уже давно во всех проблемах механики, при которых не приходилось считаться с трением или ударом неупругих тел. Но всякий раз, когда механические движения уничтожаются вследствие удара или

¹ *W. Weber*, Elektrodynamische Maassbestimmungen; Abhandl. der K. S. Ges. d. Wlssensch. zu Leipzig, 1, 1846. См. дальше отдел об электричестве в настоящей книге.

² „Pogg. Ann.“, LXXIII, стр. 193, 1848.

³ *Jacob J. Weirauch* (профессор Политехнической школы в Штутгарте), Theorie elastischer Körper, стр. 132 и 180, Leipzig 1884; Das Princip von der Erhaltung der Energie; стр. 13 и 31, Leipzig 1885.

⁴ *Helmholtz*, Wiss. Abhandlungen, I, стр. 70—71, Leipzig 1882.

ПРИМЕНЕНИЕ ЗАКОНА В ТЕОРИИ ТЕПЛОТЫ 45

трения, когда световые и тепловые лучи уничтожаются вследствие поглощения, — происходит повышение температуры, иногда же возникает электрическое напряжение, а при поглощении света нередко также фосфоресценция или химическое действие¹. Если оставить в стороне последние явления, так как в них пока еще слишком много темного, то возникает вопрос, каким образом *возникшая теплота* может быть рассматриваема как эквивалент *исчезнувшей силы*. Если бы теплота была веществом, то эквивалентом силы могла бы быть только работа, производимая теплотой при ее переходе от более высокой температуры к более низкой. Карно и Клапейрон разрабатывали данную проблему именно в этом духе и нашли, что все выводы из такой эквивалентности оправдываются, по крайней мере, для газов и паров. *Но материальная теория теплоты неприемлема*; из опытов над теплотой от трения, равно как из опытов получения и уничтожения теплоты действием электрического тока, необходимо следует, что теплота представляет собою не вещество, а движение. В силу этого известное количество свободной теплоты должно представляться нам как некоторое количество живой силы этого движения, а количество так называемой скрытой теплоты как величина того молекулярного напряжения, которое при изменении состояния тел может вызвать тепловые движения. «Для фактического доказательства положения, что определенной величине механической силы всегда соответствует определенное количество тепла, мы имеем пока лишь несовершенные опыты Джоуля²; впрочем, с этим законом согласуются также исследования и исчисления Гольцмана. *При получении тепла путем химического действия закон сохранения силы должен совпасть с законом Гесса* («Pogg. Ann.» L, стр. 392 и LVI, стр. 598), согласно которому при химическом соединении нескольких веществ в один и тот же продукт всегда получается одинаковое количество тепла, в каком бы порядке и через какие бы промежуточные ступени ни проходил акт соединения.

Наиболее плодотворным оказывается этот принцип в применении к учению об электричестве и магнетизме. Если m_1 и m_2 представляют собою два элемента электрических или магнитных масс, то сила их

¹ При отражении, преломлении, поляризации и интерференции света не происходит никакого уничтожения живой силы, изменяется только ее распределение. Живая сила упругих волн уничтожается лишь в тех процессах, которые мы называем поглощением. Поглощение звуковых волн мы можем, по-видимому, рассматривать, главным образом, как переход звукового движения в тела и уничтожение его здесь трением. Поглощение тепловых лучей сопровождается пропорциональным развитием теплоты в теле. При поглощении света мы знаем процессы трех родов. Во-первых, фосфоресцирующие тела воспринимают свет таким образом, что потом излучают его обратно в виде опять-таки света. Во-вторых, большинство, а может быть, и все световые лучи вызывают теплоту. В-третьих, во многих случаях поглощенный свет вызывает химические действия („Erhaltung der Kraft", стр. 23—25).

² Это место заимствовано из собственного реферата Гельмгольца о его работе. Подобную же оценку в позднейшем издании 1881 г. Гельмголец сопровождает следующим примечанием: „Это суждение относится к наиболее ранним, ставшим тогда известными опытам Джоуля. Позднейшие же его опыты, проведенные с полнейшим знанием дела и железной энергией, заслуживают величайшего удивления" („Wissenschaftl. Abhandlungen", I, стр. 33. Leipzig 1882).

46 ЭЛЕКТРИЧЕСТВО ОТ ТРЕНИЯ

притяжения $\varphi = -\frac{m_1 m_2}{r^2}$, а выигрыш живой силы, при уменьшении их расстояния от ∞ до r , в предположении, что их электрическое или магнитное состояние в остальном

не изменяется, равен $\int_r^\infty \varphi dr = -\frac{m_1 m_2}{r}$.

Если вместе с Гауссом назвать величину $-m_1 m_2 / r$ потенциалом, то приращение живой силы при каком-либо движении следует считать равным превышению потенциала в конце пути над потенциалом в начале его. Если же при этом изменяется и электрическое состояние частичек, то следует еще сверх того принять во внимание потенциалы обоих тел по отношению к самим себе. Если мы обозначим эти потенциалы соответственно через W_1 и W_2 , а потенциал этих тел друг по отношению к другу через V , то легко доказать, что прирост живой силы должен быть равен сумме

$$V + \frac{1}{2}(W_1 + W_2).$$

Обозначим, далее, через C_1 свободное напряжение положительного электричества, имеющегося на каком-либо проводнике в количестве Q , через C_2 — напряжение равного количества отрицательного электричества на другом проводнике, тогда количество сил напряжения, вызванных электризацией проводников, будет равно $Q(C_1 - C_2)/2$, если в качестве меры свободного напряжения принять то напряжение, которое вызывается единицей электричества на шаре с радиусом, равным единице. При разряде электричества эта сила напряжения уничтожается, вследствие чего в соединительном проводе выделяется теплота;

$$\theta = \frac{1}{2a} Q (C_1 - C_2),$$

количество этой теплоты должно быть равно

где a обозначает механический эквивалент теплоты. Если этот закон применить к лейденской банке, внешняя обкладка которой не изолирована и емкость которой можно положить равной S , то $C_2 = 0$ и

$Q = CS$; тогда $\theta = \frac{1}{2a} QC$ или $\theta = \frac{1}{2a} \frac{Q^2}{S}$. Эти выводы подтверждаются измерениями Рисса («Pogg. Ann.», XLIII, стр. 47), который нашел, что образующаяся теплота пропорциональна Q^2/S ¹, равно как и опытами Форсельман-де-Геера («Pogg. Ann.», XLVIII, стр. 292) и Кнохенгауера («Pogg. Ann.», LXII, стр. 364 и LIV, стр. 64), которые нашли, что теплота не зависит от соединительного провода.

Вольтовское понятие о контактном электричестве находится в противоречии с принципом сохранения силы, поскольку это понятие не включает в себе необходимости химических процессов. Но если допустить это последнее, если принять, что проводники второго класса не входят в гальванический ряд напряжения лишь потому, что они

¹ Рисс, правда, обозначает через S поверхность обкладки банки, но у равномерно сконструированных банок эта поверхность, конечно, пропорциональна емкости.

КОНТАКТНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО 47

проводят электричество только путем электролиза, то понятие контактной силы тотчас же существенно упрощается и сводится к силам притяжения и отталкивания. В самом деле, все явления на проводниках первого класса могут быть легко выведены из допущения, что различные химические вещества имеют различные силы притяжения по отношению к обоим электричествам и что эти притягательные силы действуют лишь на неизмеримо малых расстояниях, между тем как электричества действуют друг на друга и на больших расстояниях. Тогда контактная сила заключалась бы в разности силы притяжения, которое проявляют частицы металла, вплотную прилегающие к месту соприкосновения, по отношению к электричествам, а электрическое равновесие наступало бы, когда электрическая частица при своем переходе от одного металла к другому не выигрывает и не теряет в живой силе.

При применении закона сохранения силы к *гальваническому току* следует рассматривать, главным образом, следующие действия: *выделение теплоты, химические процессы и поляризацию*. В *цепях тока без поляризации*, если принцип сохранения силы должен иметь здесь применение, электродвижущая сила двух сочетаемых металлов должна быть пропорциональна разности количеств теплот, которые должны образоваться при их сгорании; поэтому в таких цепях, в которых химические процессы одинаковы, и электродвижущие силы должны быть тоже равны, с чем очень хорошо согласуются некоторые измерения Поггендорфа («Pogg. Ann.», LIV, стр. 429 и LVII, стр. 104). *Цепи с поляризацией* следует разделить на такие цепи, которые дают *одну только поляризацию без химического разложения*, и на цепи, в которых имеют место и *то и другое*. Ток последних можно рассматривать как состоящий из *непостоянного, или поляризационного, тока и постоянного тока, или тока разложения*. К последнему применимы все соображения, изложенные по отношению к постоянным токам без выделения газов. Вследствие *поляризации теряется часть силы первоначального тока, но эта потеря должна быть получена обратно в виде вторичного тока*. При *термоэлектрических токах* закон сохранения силы может иметь место лишь при условии, если теплота, развиваемая током, по закону Ленца, во всей цепи, и теплота, развиваемая, согласно опытам Пельтье, в более холодном спае, равны количеству тепла, поглощаемого в нагретом спае. Из этих допущений может быть затем выведен закон электротермических действий, для которого, однако, до сих пор еще не имеется проверочных опытов.

Так как *магнитные явления*, подобно электрическим, объясняются допущением двух жидкостей, которые отталкиваются в обратном отношении к квадратам расстояний, «то уже на основании сказанного в начале нашего исследования следует, что *при движении магнитных тел друг по отношению к другу* (как при движении наэлектризованных тел) сохранение силы должно иметь место». В частности Гельмгольц доказывает, что, как и в электричестве, приращение живой силы при движении магнитных тел с изменяющимся распределением магнетизма измеряется изменением суммы $V + \frac{1}{2}(W_a + W_b)$. Когда *магнит движется под влиянием тока*, то приобретаемая им при этом *живая сила* должна возникать за счет *сил напряжения, расходуемых током*.

48 ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

«Последние за частицу времени dt составляют, по принятому нами выше способу обозначения, величину $AJdt$ в тепловых единицах, или $aAJdt$ в механических, если a — механический эквивалент теплоты. Живая хила, развивающаяся в цепи тока, есть aJ^2Wdt ,

а приобретенная магнитом $J \frac{dV}{dt}$, где V — потенциал магнита по отношению к проводнику, по которому пробегает единица тока. Таким образом

$$aAJdt = aJ^2Wdt + J \frac{dV}{dt} dt;$$

следовательно,

$$J = \frac{A - \frac{1}{a} \frac{dV}{dt}}{W}.$$

Величину $\left(\frac{1}{a}\right) \cdot \left(\frac{dV}{dt}\right)$ можно рассматривать как новую электродвижущую силу, а именно — электродвижущую силу индукционного тока. Она действует всегда обратно той силе, которая двигала бы магнит в направлении, которое он имеет, или увеличивала бы его скорость. Так как эта сила не зависит от силы тока, то она остается такою же и в том случае, когда перед движением магнита тока вовсе не было». Согласно сказанному закон индукции может быть выражен следующим образом: «Вся электродвижущая сила индукционного тока, вызываемого перемещением магнита относительно замкнутого проводника тока, равна происходящему при этом изменению потенциала магнита относительно проводника, по которому мыслится проходящим ток $1/a$.

Единицей электродвижущей силы является тогда такая сила, которая вызывает произвольную единицу тока в единице сопротивления. Последней же является такое сопротивление, в котором принятая единица тока выделяет в единицу времени единицу тепла. Этот же закон встречается и у *Неймана*, но только последний вместо $1/a$ берет неопределенную постоянную ε . Гельмгольц доказывает правильность этого закона для всех случаев индукции, за исключением тех, когда индукция вызывается *изменением силы тока*, так как здесь вследствие не выясненности еще формы нарастания тока трудно придти к каким-либо заключениям.

Указав, наконец, в очень коротких словах на *химические лучи солнечного света как на единственный источник сил растений и животных* и правильно отбросив как неверное утверждение Маттеуччи, будто цинк, растворяясь в серной кислоте, дает одно и то же количество тепла, как при непосредственном его растворении, так и в том случае, когда он вместе с платиной образует гальванический элемент ¹, Гельмгольц заключает свою работу следующими замечательными словами: «Изложенным выше, полагаю, мне удалось доказать, что рассматриваемый закон не противоречит ни одному известному явлению в области естествознания, а многими из них он весьма наглядно подтверждается. Я постарался возможно полнее изложить те последствия,

¹ „Archives des scienc. phys. et nat.“, IV, стр. 375, 1847.

МАЙЕР, ДЖОУЛЬ И ГЕЛЬМГОЛЬЦ 49

которые вытекают из сочетания этого закона с известными до сих пор законами естественных явлений, и которые требуют еще экспериментального подтверждения. Целью настоящего исследования, из-за которой, надеюсь, мне простят его гипотетические части, являлось желание доказать физикам с возможной полнотой теоретическую, практическую и эвристическую важность этого закона, полное подтверждение которого представляет собой, пожалуй, одну из основных задач ближайшего будущего физики».

Установление закона сохранения силы не было делом одного или нескольких исследователей, оно было обусловлено развитием всей науки, в которой уже с самого начала столетия все сильнее чувствовалась тенденция к окончательному установлению этого закона. Но, конечно, закон должен был быть сначала официально провозглашен и технически зафиксирован в словах и формулах, прежде чем он стал известен всему научному миру и, еще больше, им был признан. Бесспорно первым и, быть может, наиболее оригинальным глашатаем его был *Майер*, подготовивший почву для этого закона изменением понятия о силе. Почти одновременно и независимо от него, но все-таки после него, *Джоуль* точнейшими измерениями доказал постоянство силы при превращениях механической работы и тепла. Независимо от Майера, но уже, по-видимому, будучи знаком с первыми работами Джоуля, *Гельмгольц* в свою очередь пытается распространить этот закон на всю область физики, идя, однако, при этом не философским путем, как Майер, а математическим. Сделать определенный выбор между этими тремя исследователями, а также и некоторыми другими, имевшими также немалые заслуги в деле установления и применения этого закона, и решить, кому из них, как какому-нибудь изобретателю в области техники, следовало бы выдать патент на открытие, — это значит, по моему мнению, совершенно не понимать ни сущности, ни значения нового воззрения, которое было достигнуто только в результате полного переворота в научных воззрениях.

Это ясно следует также из дальнейшей истории этого закона. *Быстрое принятие и правильная оценка работ Майера и Гельмгольца были затруднены преимущественно двумя обстоятельствами. Часть физиков вообще придавала мало значения общим рассуждениям о силах, признавала полезным только специальное опытное исследование отдельных физических факторов, опасалась в утверждении тождества всех сил и возможности всестороннего их превращения получить новое издание старой опостылевшей всем натурфилософии* и полагала, что от этих новых идей, во всяком случае, следует ожидать *вредного отклонения работ от заведомо плодотворного эмпирического метода. Другая же часть физиков, наоборот, смотрела на закон сохранения сил как на давно признанный идеал физики*, к которому наука будет все более и более приближаться, но к которому нельзя приблизиться при помощи упомянутых выше общих рассуждений.

Таким образом, с обеих этих сторон не было никаких побудительных оснований к тому, чтобы обратить особое внимание на упомянутые работы, скорее были достаточные основания, чтобы их совершенно обходить молчанием. *Поэтому первая работа Майера осталась как бы*

50 ГОЛЬТЦМАН. СЭГЕН

совершенно незамеченной: о ней не было упомянуто ни слова, как в научных журналах, так и в других изданиях. А по поводу приема, оказанного работе Гельмгольца, сам автор сообщает в характерных выражениях: «Я был до известной степени изумлен сопротивлением» встреченным мною в кругу специалистов: *в помещении моей работы в «Анналах» Поггендорфа мне было отказано, а среди членов Берлинской академии наук один лишь К. Г. Я. Якоби, математик, стал на мою сторону. В те времена новыми убеждениями еще нельзя было достичь славы и повышения, скорее можно было добиться обратного»*¹. Для работ Джоуля условия были более благоприятны. Против них первая группа физиков не могла выставить своих тенденциозных сомнений» другая же не могла не признать их фактической важности. *Поэтому работы Джоуля должны были показаться, по крайней мере, на первых порах, действительной основой прогресса в физике.* Постоянство отношения при превращении теплоты и механической силы, которое уже давно было высказано в принципе, было здесь доказано надежным экспериментальным путем. При таком положении дела каждому из новаторов оставалось пока *обеспечить для себя самих плоды своих идей* и постараться собственными работами сделать полезной эту бесспорно плодотворную область. Но когда физики занялись более углубленно работами Джоуля, они пришли и к лучшей оценке более общих воззрений Майера и Гельмгольца; а вскоре затем *в положении вещей произошел крутой поворот, проявившимся в многочисленных спорах о первенстве открытия, еще так недавно казавшегося неважным.*

Уже в 1845 г., в сочинении «Über die Wärme und Elasticität der Gase und Dämpfe», Mannheim 1845² («О теплоте и упругости газов и паров») Гольтцман вычислил механический эквивалент — тем же путем, как и Майер, и почти с тем же результатом³ — из отношения теплоемкости воздуха при постоянном давлении и при постоянном объеме; но при этом он продолжал придерживаться воззрения Карно на действие теплового вещества путем его падения⁴. Сэген старший опубликовал в 1847 г. работу «Note à l'appuide l'opinion émise par M. Joule sur l'identité du mouvement et du calorique» («Замечание в подтверждение высказанной г. Джоулем мысли о тождестве движения и теплорода»⁵, в которой он обратил внимание на то обстоятельство, что уже в сочинении своем «Études sur l'influence de chemins

¹ „Wissenschaftliche Abhandlungen“, I, стр. 74, 1882.

² Извлечение в „Pogg. Ann.“, дополнительный том II, стр. 183.

³ Гольтцман получил 374 кгм, а Майер 367 кгм.

⁴ В посмертном сочинении „Mechanische Wärmetheorie“, Stuttgart 1866,

Гольтцман охотно признает первенство Майера, равно как указанную Клаузиусом („Pogg. Ann.“, LXXXIX, стр. 658) ошибочность его воззрений на природу теплоты. Но, с другой стороны, он определенно утверждает, что в период составления им своего труда работы Майера ему были неизвестны и что признанию эквивалентности теплоты и работы существенно способствовала как раз его, Гольтцмана, работа, получившая очень быстро известность („Mechanische Wärmetheorie“, стр. 8—9). Carl Holtzmann (1811 — 1865) — профессор физики в Штутгартской политехнической школе.

⁵ „Comptes rendus“, XXV, стр. 420, 1847, Marc Séguin (1786—1875), — французский железнодорожный техник.

РАБОТЫ КОЛЬДИНГА 51

de fer», Paris 1839 («Очерки о влиянии железных дорог») он констатировал тождество природы и общность происхождения теплоты, потребляемой паровой машиной, и производимого ею движения. Далее, он сообщает, что на эту мысль его уже давно навел его дядя Монгольфье и что он рассчитывал подтвердить эти идеи надежными опытами и точно установленными фактами. Теперь ему удалось, хотя совершенно иным образом, чем Джоулю, придти почти к тем же результатам. А именно, он вычислил отношение между примененной силой и затраченной теплотой из охлаждения водяного пара при его расширении и таким образом определил величину механического эквивалента единицы тепла, который, как у Джоуля, оказался в среднем равным 449 кгм.

Кольдинг¹ еще ранее 1843 г. пытался обосновать закон сохранения силы, исходя из общепhilosophических соображений, и экспериментально его доказать, по крайней мере для случая превращения теплоты в механическую работу. По его собственным словам он при этом шел следующим путем². Так как силы являются существами духовными, нематериальными, которые нам известны лишь по их власти над природой, то они, без сомнения, должны быть существами значительно более высокими, чем все прочее, существующее материально; и так как, очевидно, одни лишь силы выражают ту мудрость, которую мы наблюдаем и которой удивляемся в природе, то они должны находиться в связи с той духовной, нематериальной и разумной мощью, которая руководит всяким прогрессом в природе. Но если это так, то совершенно нельзя себе представить, чтобы эти силы были существами смертными, преходящими; поэтому их следует считать, безусловно, непреходящими³. В области механики неизменность силы была уже установлена «знаменитым и плодотворным законом д'Аламбера о живых и потерянных силах». Кольдинг полагал, что этот закон можно распространить на все превращения механической работы, химической силы и других сил, и предполагал изложить свои мысли в 1840 г. на Съезде натуралистов в Копенгагене. Однако по совету многих ученых, и, прежде всего Эрстеда, он отказался от этого плана, решив сначала подтвердить свои идеи экспериментальным путем. В качестве подходящего имеющегося уже готового материала он рассматривал произведенные Дюлонгом измерения теплоты сжатия и охлаждения расширения газов, замечание Эрстеда о теплоте, развивающейся при сжатии жидкостей, и, наконец, наблюдения Бертолле и Лагерхьельма над нагреванием твердых тел при сжатии. Но тут воспоминание об измерениях теплоты трения, произведенных Румфордом, Гальда, Морози и другими, навело его на мысль о непосредственном определении связи между теплотой и механической работой. С этой целью он устроил прибор вроде саней, который давал

¹ Ludwig August Colding (1815—1888), — инженер в Копенгагене.

² „Lettres aux Rédacteurs du Philos. Magazine sur l'histoire du principe de la conservation de l'énergie" p. M.A. Colding. Из „Philosophical Magazine" (4) XXVII, стр. 56—64, переведено M. Verdet в „Ann. de chim. et de phys." (4), 1, стр. 466—477, 1864.

³ Это очень старый философский прием выводить неизменность сил природы из неизменности творца.

52 СПОР МЕЖДУ МАЙЕРОМ И ДЖОУЛЕМ О ПЕРВЕНСТВЕ ОТКРЫТИЯ

ему возможность измерять количество тепла, развивающегося при различной нагрузке и при различных скоростях от трения латуни о латунь, цинк, свинец, железо, дерево и, наконец, о сукно. *В результате почти 200 измерений было не только установлено постоянство отношения между механической работой и произведенным теплом, но также выведена средняя величина этого отношения, которая, будучи выражена в соответствующих единицах, оказалась равной отношению 350 к 1*¹.

Эти результаты были Кольдингом сообщены в первой его работе по этому вопросу (1843 г.) Королевскому обществу в Копенгагене под заглавием «Nogle Saetninger om Kraefterne». Это сообщение было им, однако, названо *предварительным*, так как закон сохранения силы он рассматривал только как *вероятный*, а не как *твердо установленный* закон природы. Общество дало ему средства устроить более совершенный прибор; результаты произведенных с ним новых опытов и измерений были доложены Обществу натуралистов в Копенгагене в 1847 г., а потом и Королевскому обществу, которое поместило их в своих «Записках» частью в 1848 г., частью в 1850 г. В 1851 г. Кольдинг опубликовал новую работу, в которой им была изложена с совершенно новой точки зрения теория паровой машины. Наконец, в 1856 г. в «Записках» Королевского общества появилась еще одна работа Кольдинга под заглавием «*Physikalische Untersuchungen über das allgemeine Verhältniss; welches zwischen den intellectuellen und den Naturkräften existirt*» («Физические исследования об общем отношении, существующем между интеллектуальными и естественными силами»), в которой он, переработав всю область натурфилософии на основе нового закона, зашел дальше Майера в том отношении, что, включив в сферу действия закона сохранения энергии также и *духовные силы*, он из неразрушимости естественных сил попытался прямо сделать вывод о *бесконечности интеллектуальной жизни человека*.

Вначале работы Кольдинга обратили на себя так же мало внимания, как и работы Майера, и только впоследствии их стали выдвигать против последнего. Сам Майер выступил с заявлением о своих правах на первенство после того, как значение опытов Джоуля стало получать все большее признание. В 1847 г. Джоуль поместил в «Comptes rendus» сообщение о своих исследованиях над механическим эквивалентом теплоты², *не упомянув при этом даже имени Майера*. Поэтому Майер³

¹ Кольдинг при этом отмечает, что это почти то же самое отношение, которое в 1842 г. „без доказательства“ дал Майер. Верде в одном примечании очень энергично опровергает последние слова: „Если бы мы пожелали одинаково строго критиковать первые работы, относящиеся к механической теории теплоты, было бы нетрудно почти совершенно аннулировать права Кольдинга и Джоуля... Когда Джоуль нашел для соотношения между затраченной работой и теплотой, выделяющейся в магнитоэлектрической машине, различные числа, которые колебались между 321 и 571, то можно было утверждать, что на основании этих данных Джоуль должен сделать вывод об *отсутствии постоянного отношения* между этими величинами. *Несправедливость подобных заключений совершенно очевидна; но не менее очевидна, по нашему мнению, и несправедливость критики, направленной с различных сторон против Майера* („Ann. de chim. et de phys.“ (4), стр. 470—471, 1864).

² „Comptes rendus“, XXV, стр. 309—311, 1847.

³ Там же, XXVII, стр. 385—387, 1848.

СПОР МЕЖДУ МАЙЕРОМ И ДЖОУЛЕМ О ПЕРВЕНСТВЕ ОТКРЫТИЯ 53

в следующем году в том же журнале сообщил о *зарождении своих первых идей* о законе сохранения силы в Сурабайе в 1840 г., затем о *первом* произведенном им *определении механического эквивалента теплоты* в 1842 г. и, наконец, о *подробном изложении этих идей* в его работе 1845 г.; в этом сообщении он, со своей стороны, тоже ни словом не упомянул о Джоуле. После этого Джоуль счел себя вынужденным *выступить с критическим отзывом* о работах Майера, в котором он не проявил особенной глубины и которому, пожалуй, лучше было бы совсем не появляться ¹. Описывая вначале ход развития своего открытия, он уверяет, что *во время своих работ он не имел ни малейшего понятия о сочинении Майера 1842 г.* Далее он утверждает, что *постоянство теплостойкости газа при всех изменениях его плотности было впервые установлено лишь благодаря его, Джоуля, измерениям*, между тем как на основании всех прежних опытов, в особенности опытов Марсэ и де-ла-Рива, можно было ожидать скорее обратного. *При этих условиях Майер не имел основания, по его мнению, сделать того вывода, что вся теплота, затраченная при расширении газа, эквивалентна произведенной им при этом внешней работе*; а вместе с тем, следовательно, и самое определение механического эквивалента, произведенное Майером, теряет свою силу. Указав далее на заслуги Румфорда, Дэви и Сегена в области механической теории теплоты, Джоуль заканчивает свою статью следующим выводом: «На этом основании каждый признает остроумие Майера, предсказавшего численные отношения, которые *должны быть установлены* между теплотой и силой; но нельзя, мне кажется, отрицать, что я был первым, доказавшим существование механического эквивалента теплоты и *определившим* его численную величину с помощью бесспорных опытов».

Майер опроверг эти суждения настолько легко и убедительно, насколько только это было возможно ². Джоуль, — говорит он, — *был бы прав, если бы Гэ-Люссак уже в 1807 г. не доказал* («Mém. d'Arc», I, стр. 180), *что газы могут расширяться без всякой затраты теплоты и внешней работы*. Затем он приводит подлинное место из своей работы 1845 г., где он сослался на этот опыт ³, и заканчивает свою статью следующими прекрасными, исполненными достоинствами словами: «*Впрочем, я убежден, что Джоуль сделал свои открытия о теплоте и силе, не зная моих, и признаю, что многочисленные заслуги этого известного физика внушают мне большое к нему уважение; но, тем не менее, я полагаю, что могу с полным правом снова повторить, что закон эквивалентности теплоты и живой силы, с его численным выражением, опубликовал впервые я (в 1842 г.)*»... Во всяком случае, Джоуль, делая свое первое заявление, подобно большинству противников Майера, знал лишь *первую предварительную работу Майера 1842 г.*; к сожалению, этот ряд полемических статей в «Comptes rendus» прервался на только что

¹ Там же, XXVIII, стр. 132—135, 1848.

² Там же, XXIX, стр. 534—535, 1849.

³ „Die organische Bewegung" в „Mechanik der Wärme", стр. 11: „Гэ-Люссак на опыте доказал, что упругая жидкость, переходя из одного баллона в другой, равной величины и не содержащий воздуха, охлаждается в первом сосуде как раз на столько градусов, на сколько она нагревается во втором".

54 ВЫСТУПЛЕНИЯ КЛАУЗИУСА И ТИНДАЛЯ В ЗАЩИТУ ПРАВ МАЙЕРА

приведенном ответе Майера, я Джоуль не имел случая исправить свою явную ошибку, происшедшую вследствие недостаточного знакомства с работами Майера¹.

Если Майеру при помощи приведенной выше статьи удалось настолько обратить внимание на свои работы, что после этого, по крайней мере, французские и немецкие физики стали в большинстве случаев ставить его имя в связь с новыми идеями о силе, то, с другой стороны, условия его яичной жизни сложились столь неблагоприятно, что он в течение целых десяти лет был лишен возможности лично продолжать начатое им дело². Поворот к лучшему в этих печальных судьбах Майера наступил лишь в начале шестидесятих годов; нельзя не порадоваться, что в таком повороте не малую роль сыграл английский физик Джон Тиндаль. Клаузиус, лицо прикосновенное к этому пово-

¹ В историческом введении к своему главному сочинению 1850 г. Джоуль снова цитирует только работу Майера 1842 г. и притом в выражениях, не затрагивающих самой сути вопроса: „Первое упоминание об опытах, в которых было установлено возникновение теплоты от трения жидкостей, принадлежит, насколько мне известно, Майеру, который утверждает, что взбалтыванием воды он поднял ее температуру от 12 до 13°; при этом он, однако, не указывает величины затраченной им работы и не упоминает о мерах предосторожности, примененных для обеспечения точности результата" („Mechanische Wärmeäquiv.", стр. 91, Braunschweig 1872). В следующем году по поводу гипотезы о полной эквивалентности между работой, затраченной на сжатие воздуха и полученной при этом теплотой, он высказывается несколько более объективно: „Позднее я увидел, что подобную же гипотезу раньше меня высказал Майер, хотя он не сделал никаких попыток доказать ее правильность опытным путем" („Mechanische Wärmeäquivalent", стр. 122). Несмотря на совершенно точную и ясную поправку Майера, Тэт позднее повторял приведенное выше возражение Джоуля почти в той же неизменной форме („Über einige Fortschritte etc.", стр. 46, Braunschweig, 1877).

² Гельмгольц, который еще в „Fortschritten der Physik" за 1847 г. приводит работу Майера лишь для полноты, в том же издании за 1849 г. (т. V, стр. 241—142, Berlin 1852), говорит: „Утверждение о неразрушимости величины работы механических сил и об эквивалентности проявлений различных естественных сил определенным величинам механической работы высказал впервые Майер в 1842 г.". В своем обзоре за 1850 и 1851 гг. он говорит „о гипотезе, впервые высказанной Майером" и затем принятой Джоулем и автором обзора; после этого он уже всегда Майера ставит на первое место среди основоположников механической теории теплоты. В. Реньо в 1853 г. („Comptes rendus", XXXVI, „Pogg. Ann.", XXXIX, стр. 339) признает заслуги Майера в области механической теории теплоты: „Джоуль, Томсон и Ранкин в Англии, Майер и Клаузиус в Германии... разработали исчисление механической теории теплоты и попытались вывести из нее законы всех явлений, наблюдаемых в газах. С своей стороны, я уже давно излагал в своих лекциях подобные же идеи". Наоборот, Уэвелл еще в 1857 г. в третьем издании своей в остальном совершенно беспристрастной „History of the inductive sciences" (II, стр. 487, Additions to the III Edition) говорит по поводу механического эквивалента теплоты следующее: „Основы этой теории были, по-видимому, заложены Джоулем в 1844 г.; после этого она была разработана им, а также проф. Томсоном с помощью различного рода экспериментальных исследований". А Поггендорф, в соответствующем выпуске своего „Biographisch-literarischen Handwörterbuch" (т. II, стр. 94) приводит по поводу Майера даже такого рода сведения: „По-видимому, умер раньше 1838 г. в доме умалишенных („Augsb. Allgem. Zeitung"); однако в прибавлении (II, стр. 1428) — надо думать по настоянию самого Майера — сделана следующая поправка: „не умер в 1838 г. в доме умалишенных, а в настоящее время (1862 г.) еще жив"...

ВЫСТУПЛЕНИЯ КЛАУЗИУСА И ТИНДАЛЯ В ЗАЩИТУ ПРАВ МАЙЕРА 55

роту, рассказывает по этому поводу следующее ¹: «До начала шестидесятых годов работы Роберта Майера были очень мало известны. Из них только первая, короткая статья, не лишенная некоторых недостатков редакционного характера, появилась в 1842 г. в научном журнале и благодаря этому получила распространение в более широких кругах; остальные же, будучи напечатаны в виде отдельных брошюр, были преданы забвению, так как во время их появления мало кто интересовался этим вопросом. Я сам в это время знал лишь его первую работу; поэтому и получилось, как об этом правильно сообщает Тиндаль в нижеприводимом докладе, что когда Тиндаль в 1862 г. обратился ко мне с запросом о содержании работ Майера, я ему ответил, что, по моему мнению, он в них не найдет много интересного, но что, во всяком случае, я постараюсь их ему достать. Но когда я затем получил от книгопродавца из Гейльбронна брошюры Майера и перед отправкой Тиндалю сам их прочитал, то увидел, что ошибся: в этих брошюрах Майер не только исправил прежние недочеты в своих механических представлениях — совершенно, впрочем, понятные во враче-практике, принимающемся впервые писать о механических вопросах, — но проявил наряду с ясным и отчетливым изложением своих воззрений достойное удивления богатство идей, хотя со всем там изложенным и нельзя было согласиться ². Поэтому, пересылая эти работы Тиндалю, я взял свои прежние слова назад и указал ему на те стороны, которые в этих работах я признал особенно существенными. В это время, по случаю Промышленной выставки 1862 г. в Лондоне, Тиндалю предстояло сделать публичный доклад в Royal Institution перед многочисленной избранной аудиторией, съехавшейся из различных стран. Темой для своего доклада он избрал сочинения Майера и в обычной для него увлекательной форме изложил все основные выводы работ Майера. Когда публика, в сильнейшей степени заинтересовавшаяся данным вопросом, естественно, пожелала узнать, кому принадлежат все эти исследования, Тиндаль

¹ „Die mechanische Behandlung der Elektrizität“, стр. 325—326, Braunschweig 1879. John Tyndall (1820—1893), изучал физику в Марбурге и Берлине; с 1853 г. — профессор физики в Royal Institution в Лондоне.

² Для Майера было крайне важно, что, наконец, обратили внимание на его более поздние работы, последовавшие за статьей 1842 г.; неправильная оценка его заслуг происходила в большинстве случаев оттого, что постоянно ссылались только на его первую работу. Об этом, между прочим, говорят следующие слова У. Томсона, сказанные им в 1851 г. и не совсем еще в общем неблагоприятные для Майера: „Первым опубликованным в печати сообщением об этом принципе (эквивалентности между механической работой и теплотой), невидимому, является работа Майера „Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur“, которая содержит в себе несколько правильных суждений по вопросу о взаимной превратимости тепла и механической работы, наряду с неправильной аналогией между приближением груза к земле и уменьшением объема непрерывной массы, причем на основании этой аналогии Майер попытался построить определение механического эквивалента для данного количества теплоты... В работе, опубликованной спустя примерно четырнадцать месяцев после этого... Джоуль из Манчестера изложил очень ясно свои выводы по вопросу о взаимной превратимости теплоты и механической работы... и определил на бесспорных основаниях абсолютные численные отношения, связывающие между собою теплоту и механическую силу“ („Edinburgh. Trans.“, XX, стр. 262, 1853 г., доложено 17 марта 1851 г.).

56 НАПАДКИ ТЭТА НА МАЙЕРА

назвал имя человека, который, живя в маленьком немецком городке, без всякой научной поддержки и поощрения, с удивительной энергией и настойчивостью работал над развитием своих гениальных мыслей».

К сожалению, этот смелый благородный поступок Тиндаля не обошелся без неприятностей для него лично. «Вскоре после этой лекции в одном очень распространенном, но не научном, английском журнале «Good Words» появилась статья «Energy», подписанная Томсоном и Тэтом, но составленная только последним, как это явствует из одного более позднего замечания Тэта. В этой статье после упоминания о первой работе Майера говорится: *«На основании этой работы была сделана попытка присвоить Майеру честь первого открытия принципа сохранения энергии в общем его виде. Конечно, верно, что «наука не имеет отечества» и британским философам делает величайшую честь, что они повели себя столь либерально соответственно этой истине. Однако не следует полагать, что эта истина совершенно исключает возможность научного патриотизма или что при своем желании воздать должное иностранцу мы обязаны обесценивать или попира́ть права своих собственных граждан. Особенно страшит нас то обстоятельство, что предпринятая недавно попытка посадить Майера на то место, на которое он сам никогда не притязал и которое задолго до того было занято другим лицом, нашла поддержку в тех самых стенах, в которых Дэви излагал свои замечательные открытия».*

За этой указанной Клаузиусом статьей последовала продолжительная, временами очень обостренная, полемика между Тиндалем и Тэтом (профессором физики в Эдинбурге), которая велась преимущественно в «Philosophical Magazine» (XXV, XXV, XXVIII, 1863—1864) и которую последний продолжил в брошюре 1868 г. «Scetch of Thermodynamics» («Очерки термодинамики»), а также в более обширном сочинении «Lectures on some Recent Advances in Physical Science», London 1876 («Лекции о некоторых новых успехах в области физических наук»). В интересах исторической справедливости мы должны коснуться и этих работ. Первую из них, «Scetch of Thermodynamics», Тэт предварительно распорядился отпечатать в ограниченном количестве экземпляров и разослал их для отзыва некоторым специалистам, между прочим, Гельмгольцу и Клаузиусу. Гельмгольц ответил ему в *явно неодобрительном тоне*: «Что касается Роберта Майера, то я могу понять ту точку зрения, которой вы придерживаетесь по отношению к нему, но я все-таки не могу упустить случая, чтобы высказать, что я не вполне придерживаюсь этого мнения... Хотя никто, таким образом, не станет отрицать, что Джоуль сделал гораздо больше Майера и что в первых работах Майера многие частности неясны, но я все-таки полагаю, что на Майера следует смотреть, как на человека, который независимо и самостоятельно пришел к этой мысли, обусловившей величайший современный прогресс естественных наук. Заслуга его не становится меньшей оттого, что одновременно с ним другой ученый, в другой стране и на другом поприще сделал то же самое открытие И впоследствии развил его даже лучше, чем он»¹. Письмо Клаузиуса на-

¹ *Helmholtz, Wissensch. Abhandl., I, стр. 72 и 73.*

НАПАДКИ ТЭТА НА МАЙЕРА 57

писано более резко: «Позвольте мне в заключение еще сказать Вам... прямо, что, по моему мнению, Ваша статья, в настоящем ее виде, может только повредить Вашей собственной столь высокой научной репутации. Любой читатель с первого взгляда увидит, что это не неллицеприятное историческое изложение вопроса, чего бы следовало ожидать от ученого вашего ранга, а проникнутая партийностью статья, написанная только для прославления некоторых немногих лиц. Я сам высоко ценю этих самых лиц, но полагаю, что из-за них не следует унижать других»¹. Несмотря на это, рассматриваемая работа вышла в свет почти в неизменном виде, а в позднейшей работе 1876 г. Тэт выражается о Майере еще с большей резкостью и с такой односторонностью, что печальнее этого трудно себе представить: «Хотя мы еще и не располагаем всеми данными для суждения по этому вопросу, но уже пришло время поставить Майера, насколько это возможно, на соответствующее ему место. Его неразумно восхвалили, а был он человеком несчастным, поэтому естественно ожидать крика негодования против всякого, кто возьмет на себя необходимую задачу определить его действительные заслуги. Но в истории науки не существует *argumentum ad misericordiam* (соображений жалости). Осуждение, если о таком может быть речь в подобном деле, падает на голову тех, кто ложно приписывает ему то, чего он совершенно не сделал»². «Создан и экспериментально доказан был закон сохранения энергии в его общем виде бесспорно Кольдингом в Копенгагене и Джоулем в Манчестере»³.

Тэт настаивает на том, что первым моментом в деле разработки закона сохранения энергии должно было быть установление эквивалентности между теплотой и работой; а так как Майер никаких собственных опытов в этом направлении не сделал, а использовал лишь наблюдения других физиков, то Тэт полагает, что можно совершенно отрицать какие бы то ни было заслуги Майера в этой области. При этом Тэт совершенно упускает из виду необходимость предварительного анализа, очищения и преобразования понятия о силе, считая весь закон собственно достаточно уже обоснованным признанною на опыте невозможностью вечного движения (*perpetuum mobile*)⁴. Но, с одной стороны, Тэт упускает из виду теоретико-познавательное происхождение

¹ *Clausius*, Die mechanische Behandlung der Elektrizität, стр. 329, 1879.

² „Vorlesungen über einige Fortschritte etc.“, стр. 48, Braunschweig 1877.

³ Там же, стр. 49. Следует отметить, что сам Кольдинг не претендует на приписанное ему здесь первенство перед Майером. Вот что он сам пишет по этому поводу в совершенно ясных выражениях („Ann. de chim. et de phys.“ (4), I, стр. 467): „Полагаю, вам известно, что Верде и Гельмгольц, на основании тех частей моих работ, которые были в их распоряжении, сочли нужным поставить мое имя в истории открытия нового начала непосредственно вслед за Майером“.

⁴ „Vorlesungen über einige Fortschritte etc.“, стр.59, Braunschweig 1877. О том, что и Джоуль не был согласен с этим доводом, можно заключить из многих мест его сочинения, например из следующего: „Так как я держусь того мнения, что только творец имеет силу уничтожать, то я согласен с Роже и Фарадеем в том, что всякая теория, приводящая в своих последствиях к возможности уничтожения сил, по необходимости неверна“ („Das mechanische Wärmeäquivalent“, стр. 75).

58 МНЕНИЯ О ФИЗИЧЕСКОМ ВЕЧНОМ ДВИГАТЕЛЕ

этого закона как основы всей физики, а с другой стороны, — здесь сказывается незнание истории фактических воззрений на понятие *perpetuum mobile*, каким оно было у физиков того времени. Конечно, опытные доказательства против возможности вечного движения, построенного только на действии механических сил, можно считать, существовали уже и в то время; но что, несмотря на это, *perpetuum mobile* все-таки не считалось абсолютно невозможным, ясно видно из следующих слов уважаемого физика Мунке, которые можно найти в «Физической энциклопедии» Гелера¹ и которые мы уже однажды частично цитировали: *«Если речь пойдет о perpetuum mobile physicae (физическом вечном двигателе), то не подлежит никакому сомнению, что таковой возможен, ибо круговорот вещей в природе длится непрерывно и непрерывно возобновляется. Поэтому, если удастся использовать какую-либо подобную имеющуюся в природе силу для приведения в движение прибора, то эта задача будет разрешена. В действительности различные механизмы такого рода существуют, только зачастую мы недостаточно обращаем на них внимание с этой специальной точки зрения. Так, между прочим, наша планетная система представляет настоящий perpetuum mobile; в меньшей степени — вращающаяся около своей оси земля; река, текущая непрерывно, благодаря непрерывной смене испарения и осадения; барометр, с его непрерывными колебаниями, вследствие никогда не прекращающихся воздушных течений; ежедневно колеблющаяся магнитная игла, — все эти и бесчисленные другие приборы движутся, без сомнения, непрерывно, но движущая сила или причина их движения лежит в природе. Все они принадлежат к тому классу механизмов, которые можно обозначить общим названием perpetuum mobile physicae... Основанный на этом взгляд с вытекающими из него определениями представляется мне настолько простым и ясным, что я считаю излишним к нему что-либо прибавлять. Совершенно иное представляет собою perpetuum mobile mechanicae (механический вечный двигатель), который обыкновенно и имеют в виду, когда речь идет о возможности его построения». С точки зрения этих слов известного и авторитетного физика, написанных им в 1833 г. и никем фактически не опровергнутых вплоть до 1842 г., современной физике с ее законом сохранения энергии как главной основой пришлось бы очень плохо, если бы этот закон опирался только на опытно доказанную невозможность вечного движения в самом общем смысле. Эти слова скорее показывают, что невозможность perpetuum mobile не является опытным положением, из которого можно вывести закон сохранения силы, и что, наоборот, только вытекающая из правильно построенного понятия о силе невозможность созидания и уничтожения сил укрепила идею о невозможности perpetuum mobile и обеспечила ей всеобщее признание.*

В какой мере одностороннее превознесение экспериментального метода и полное отрицание значения дедукции в физике основаны у Тэта на достаточно глубоком философском исследовании научных методов, мы здесь сказать не можем. Но, во всяком случае, он про-

¹ „Wörterbuch der Physik". VII, стр. 410—411, 2 изд.. 1833.

МНЕНИЯ О ФИЗИЧЕСКОМ ВЕЧНОМ ДВИГАТЕЛЕ 59

являет национальный патриотизм и в научной области, склонность к превознесению заслуг своих соотечественников и легкость в умолчании заслуг иностранцев, благодаря чему объективное отношение к историческому развитию и к заслугам ее деятелей у него в высшей степени затруднено. Из многих мест его сочинения, свидетельствующих о том, что он не всегда победоносно преодолевает подобные трудности, я приведу только два. Согласно Тэту, основоположником новой физики является не Галилей, а англичанин Гильберт; Галилей рассматривается только позднее, одновременно с англичанином Ньютоном¹. Подобно этому и датчанин Кольдинг выводится в качестве соучастника в открытии закона сохранения силы, в противовес немцу Майеру; но Кольдинг, по его собственному признанию, был впервые наведен на это открытие принципом д'Аламбера; по мнению же Тэта этот принцип есть не что иное, как частный случай ньютоновского закона о равенстве действия и противодействия. *«Таким образом, вы видите, — говорит Тэт², защищая без особой нужды права своего соотечественника Ньютона, — что в сущности Кольдинг был наведен на свою мысль работой Ньютона»*. Позднее Тэт, помимо Кольдинга, открыл еще другого ученого, который показался ему подходящим для уничтожения всяких прав Майера. *«Уже после выхода в свет настоящего сочинения (в апреле 1876 г.), — говорит он³, — мое внимание обратили на работу Мора, которая аннулирует почти все, что было сказано в пользу первой работы Майера... В сочинении Мора содержится почти все, что есть правильного в работе Майера, и притом в гораздо более совершенной форме... Как раз тот прием (исчисления механического эквивалента теплоты из теплоемкости воздуха при постоянном давлении, с одной стороны, и при постоянном объеме — с другой), по поводу которого Майер так превозносится многими, — хотя в принципе, если не прак-*

¹ „Vorlesungen über einige Fortschritte etc.“, Braunschweig 1877, стр. 10—11: „Творцом настоящей экспериментальной науки был, по-видимому, Гильберт из Кольчестера, по справедливости прославленное сочинение которого „De magnete“ было опубликовано 300 лет назад. За ним явились Галилей и Ньютон, сделавшие гигантские шаги в истинном направлении и установившие на все времена тот единственный путь, по которому только и можно дойти до открытия физических законов”.

² Там же, стр. 50.

³ „Vorlesungen über einige Fortschritte etc.“, Braunschweig 1877 г., предисловие ко второму изданию, стр. IX. Соответствующая статья Фридриха Мора „Über die Natur der Wärme“, на которую, кстати сказать, Тэт неправильно ссылается как на появившуюся якобы в „Анналах“ Либига за 1837 г., имела своеобразную судьбу. Мор послал свою рукопись в 1837 г. Поггендорфу, но последний не принял ее для своего журнала, так как в ней „не содержалось никаких новых экспериментальных исследований“. Послав затем рукопись в Вену Баумгэртнеру и не получив от него ответа, Мор счел эту рукопись потерянной. Только в 60-х годах ему указали, что его статья все-таки была напечатана в журнале Баумгэртнера и Гольгера „Zeitschrift für Physik“ (V, стр. 419, 1837 г.). Достав с большим трудом один экземпляр этого журнала, давно прекратившегося и ставшего уже библиографической редкостью, Мор заново отпечатал свою статью без всяких изменений и выпустил ее отдельной небольшой брошюрой под заглавием „Allgemeine Theorie der Bewegung und Kraft“ („Общая теория движения и силы“), Braunschweig 1869.

60 РАБОТА МОРА О ПРИРОДЕ ТЕПЛОТЫ

тически, он совершенно неправилен, — изложен у Мора гораздо яснее, чем это было сделано Майером пять лет спустя». *Понять генезис этих суждений Тэта еще труднее, чем все высказанное им раньше.* Действительно, в упомянутой работе 1837 г. Мор устанавливает чистую теорию теплоты как движения; предвосхищая в ряде пунктов позднейшие кинетические теории теплоты, он дает такое определение газов, которое в своей основе почти совпадает с позднейшею механической теорией газов ¹, и, наконец, он совершенно ясно излагает принцип единства всех сил природы и их взаимной роевратимости ².

Но из того, что содержится в первой работе Майера по вопросу о постоянстве сил природы и что собственно составляет сущность новых воззрений на силы, в трактате Мора ничего не имеется. Мор применяет еще слово сила по-прежнему в смысле элементарного свойства материи, о замене этого понятия другим понятием ограниченной работоспособности, необходимость чего Майер так ясно выдвигает, у Мора нет и помину. *Все положения Мора относятся лишь к превращению форм сил; в рассмотрение же величин силы и в особенности сохранения ее при всех превращениях — он совершенно не входит.* Исчисление механического эквивалента по теплоте сжатия «воздуха внесено в сочинение Мора при чтении самим Тэтом, так как вычитать этот факт из брошюры Мора человеку, не знающему его наперед, совершенно невозможно. Да и сам Мор нисколько не считает себя соперником Майера: признавая без всякой зависти заслуги Майера в деле установления механического эквивалента теплоты, он оставляет за собою — и с полным правом, как показывает его работа — лишь место одного из первых приверженцев теории теплоты как движения и идеи о единстве всех сил природы ³. Таким образом Тэт вторично имел несчастье попытаться использовать в борьбе против Майера, в качестве соперника последнего, такого человека, который сам в этом спорном деле ставит Майера впереди себя.

К сожалению, и у нас в Германии нашлось сочинение, которое, пожалуй, еще более односторонне и ошибочно, чем работа Тэта, пытается не осветить заслуги Майера в должном свете, а совершенно уничтожить заслуги его соперника. В то время как сам Майер старался превзойти Джоуля в великодушном признании чужих заслуг,

¹ „Газообразным мы называем такое тело, у которого вибрации настолько усилены, что частицы его уже выходят за пределы этих притяжений и только взаимно отталкиваются" („Allgem. Theorie der Bewegung und der Kraft", стр.90).

² „Кроме известных 54 химических элементов, в природе вещей существует еще только один агент, называемый силой. При соответствующих условиях он может проявиться как движение, химическое сродство, сцепление, электричество, свет, теплота и магнетизм; а из каждого подобного явления могут быть воспроизведены все прочие" („Allgem. Theor. der Bewegung und der Kraft", стр. 103).

³ Сравн. „Allg. Theor. der Bew. und d. Kraft", стр. 80—84. Karl Friedrich Mohr (1806—1879) — сначала аптекарь в Кобленце, потом (1864 г.) приват-доцент, а с 1867 г. профессор фармации в Бонне. Упомянутая здесь работа вышла в качестве прибавления к большому сочинению „Mechanische Theorie der chemischen Affinität" („Механическая теория химического сродства"), Braunschweig 1868.

Дюринг в своей книге «Robert Mayer, der Galilei des 19. Jahrhunderts», Chemnitz 1880 («Роберт Майер, Галилей XIX в.») явно старается восполнить недосказанное, по его мнению, Майером и выставляет Джоуля прямым подражателем Майера на том лишь основании, что первая работа Джоуля появилась позднее первой работы Майера. «Этот Fellow (член) Лондонской академии наук, со своей парой повторительных опытов, возомнил себя единственным. Но в действительности этот Fellow был лишь подражателем, и если может идти речь о его талантах и заслугах, то это, конечно, лишь таланты подражания»¹. Эти слова Дюринга настолько ясно определяют полемический характер названной его работы как *ненаучного памфлета*², что мы со спокойной совестью о ней здесь больше говорить не будем. Заканчивая на этом грустную повесть о разногласиях по поводу приоритета, мы приведем здесь прекрасные слова Тиндаля, к которым присоединяемся от всей души³: «На работах Майера лежит некоторая печать глубокого созерцания, достигшего в уме автора силы несомненного убеждения. Работы Джоуля являются, наоборот, экспериментальными доказательствами. Майер завершил свою теорию умственно и довел ее до ее прекрасных применений. Джоуль разработал свою теорию и сообщил ей надежность закона природы. Верный умозрительному инстинкту своей страны, Майер сделал великие и важные выводы из своих исходных положений, англичанин же больше всего старался о том, чтобы с полной неоспоримостью установить факты. *Полагаю, что будущий историк науки не станет смотреть на этих людей как на соперников*».

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ТЕОРИИ ТЕПЛОТЫ (приблизительно от 1840 до 1860 г.). Так как новые воззрения на сущность и действие сил природы лишь медленно прокладывали себе путь, то и *механическая теория теплоты*, в основе которой лежали именно эти воззрения, не могла развиваться быстро. Лишь после того как было всесторонне изучено и получило общее признание постоянство отношения между теплотой и механической работой, оно могло быть использовано для ниспровержения старой вещественной теории теплоты и для обоснования необходимости разработки новой теории теплоты. Поэтому-то после работ Майера и Джоуля прошло почти целое десятилетие, прежде чем укрепилось новое движение в области учения о теплоте, но, однажды начавшись, оно стало развиваться с тем большей быстротой. *Вначале работы экспериментальных физиков в течение нескольких лет протекали еще полностью в области старых проблем; однако и последние, как бы сами по себе, без всякого предвзятого намерения со стороны этих работников, постепенно отдаляли последних от старой теории и приводили к результатам, послужившим основанием для новой теории.*

¹ „Robert Mayer, der Galilei des 19. Jahrhunderts“, стр. 56.

² Если приведенные выше слова кого-нибудь недостаточно убедили, он сам без труда может найти в сочинении Дюринга еще много более резких суждений.

³ *Tyndall, Die Wärme, betrachtet als eine Art der Bewegung*, стр. 96—97, Braunschweig 1867 (имеется перевод на русский язык: „Теплота как род движения“).

62 ОПЫТЫ КНОБЛАУХА НАД ЛУЧИСТОЙ ТЕПЛОТОЙ

Кноблаух ¹ занялся опытами Меллони над лучистой теплотой и повел их успешно дальше. В большой работе «De calore radiante disquisitiones experimentis quibusdam novis illustratae», Berlin 1846 ² («Исследования о лучистой теплоте, поясненные некоторыми новыми опытами») он, идя по стопам Меллони, но, только применяя больше предосторожностей против возможных источников ошибок ³ и более совершенные приборы, исследовал: *прохождение лучистого тепла через теплопрозрачные тела, нагревание тел при прохождении лучистой теплоты, тепловую излучательную способность тел, свойства тепловых лучей, испускаемых различными телами при различных температурах, диффузное отражение тепла от различных тел и, наконец, свойства световых лучей, испускаемых различными источниками тепла.* В качестве специальных результатов своих исследований Кноблаух указывает на следующее. Прохождение лучистого тепла через теплопрозрачные тела не находится в прямом отношении к температуре его источника, а зависит только от свойств теплопрозрачного вещества, которое для одних лучей более проницаемо, чем для других, независимо от того, возникли ли они при более высокой или более низкой температуре. Нагревание тела лучистой теплотой, при равной интенсивности падающих на него лучей, не зависит от температуры их источника, а зависит лишь от природы поглощающего тела, которое по отношению к одним лучам более восприимчиво, чем по отношению к другим. В известных пределах тело нагревается тем сильнее, чем оно толще, и притом тем в большей степени, чем менее оно прозрачно для данных лучей. Поглощение и излучение тепла соответствуют друг другу лишь постольку, поскольку они являются функциями одного и того же тела и поскольку в расчет не принимается природа тепловых лучей. Установленное Меллони положение, что исчерченность поверхности тела влияет на тепловую лучеиспускающую способность лишь в той мере, в какой она изменяет плотность и твердость вещества, и что она усиливает или ослабляет лучеиспускание в зависимости от того, разрыхляет ли она или уплотняет соответствующие места, подтвердилось. Излучательная способность тела не зависит от природы тех лучей, благодаря поглощению которых оно нагрелось. Каковы бы ни были толщина и свойства поверхностей твердых тел, все они, как показывают имеющиеся пока в нашем распоряжении средства, излучают теплоту равномерно, независимо от способа возбуждения этого излучения, в пределах осуществленных до сих пор опытов, а именно — в температурном интервале от 30 до 115° С. Диффузия теплоты на шероховатых поверхностях не находится ни в какой связи

¹ Karl Hermann Knoblauch родился в 1820 г. в Берлине; сначала — приват-доцент в Берлине, потом (1849 г.) — экстраординарный профессор в Марбурге, с 1853 г. — ординарный профессор в Галле и президент Леопольдино-Каролинской академии; умер в 1895 г.

² Также „Pogg. Ann.“, LXX, стр. 205 и 337; LXXI, стр. 11. Реферат автора, в „Fortschritte der Physik“, издаваемых Берлинским физическим обществом, II, стр. 280—311.

³ Так, например, для катушки своего гальванометра Кноблаух применил медь, осажденную гальваническим путем, т. е. совершенно свободную от железа.

ТЕПЛОВЫЕ ЦВЕТА. ДВОЙКОЕ ПРЕЛОМЛЕНИЕ ТЕПЛОТЫ 63

с температурой источника. Диффузное отражение от одних тел видоизменяет лучистую теплоту в значительной степени, от других — совершенно не изменяет. При одном и том же веществе эти видоизменения не зависят от состояния поверхности. Изменения теплоты при диффузном отражении обуславливаются как природою источника теплоты, так и свойствами отражающих тел. Они являются лишь следствием избирательного поглощения отражающих тел по отношению к известным тепловым лучам, падающим на них. Многообразию тепловых лучей, испускаемых одним и тем же телом, вообще при более высоких температурах выше, чем при низких, однако оно не растет всегда с температурой и не находится в заметной связи с лучеиспускательной способностью.

Этими исследованиями было вновь доказано существование различных тепловых лучей, которые в своем отношении к телам проявили те же отличительные особенности, какие присущи световым лучам различных цветов. Поэтому впоследствии это дало основание назвать эти разнородные тепловые лучи *тепловыми цветами*. Аналогия эта оказалась настолько полной, что все вышеприведенные результаты можно было предсказать на основании соответствующих свойств световых лучей. *Но благодаря этому представлялось совершенно необходимым доказать и на тепловых лучах все свойства световых лучей, поскольку последние только не связаны с вполне определенной длиной волны.* Кноблаух исследовал с. большим усердием и эту задачу и блестяще ее разрешил. Уже в 1848 г. он поместил в журнале «Poggendorff's Annalen» ряд статей о *двойном преломлении, поляризации и дифракции лучистой теплоты*, в которых он до известной степени исчерпал эту тему.

Берар нашел, что оба изображения источника света в призме известкового шпата проявляют одинаковые тепловые свойства, и отсюда сделал вывод о *двойном преломлении теплоты*; Форбс и Меллони пришли к тому же выводу, так как слюдяная пластинка оказалась способной до известной степени нейтрализовать поляризацию теплоты. Кноблаух¹ пропускал солнечный луч из гелиостата через два расположенных друг за другом узких отверстия, образованных двумя парами стальных остриев, на кристалл известкового шпата и исследовал изображения с помощью линейного термостолбика в 0,26 мм шириною. При медленном перемещении последнего он получил сначала отклонение стрелки гальванометра на 20°,5, затем обратное смещение на 5°, а затем снова отклонение на 20°,75. Дальнейшими опытами он вполне определенно доказал, что при двойном преломлении тепловые лучи разлагаются на *неподвижную* группу лучей (обыкновенные лучи) и *подвижную* (необыкновенные лучи); что обе эти группы имеют всегда одинаковую интенсивность; что необыкновенный пучок всегда бывает смещен в главном сечении; что при вращении кристалла необыкновенный пучок всегда вращается около обыкновенного, что оба пучка не расходятся, когда лучи падают на кристалл параллельно его оси, и что, следовательно, при двойном преломлении тепловые лучи ведут себя совершенно так же, как световые лучи.

¹ „Über die Doppelbrechung der strahlenden Wärme“, „Pogg. Ann.“, LXXIV, стр. 1.

64 ПОЛЯРИЗАЦИЯ И ДИФРАКЦИЯ ТЕПЛОТЫ

Для того чтобы исследовать *поляризацию теплоты при отражении*, Кноблаух ¹ брал для своего гелиостата зеркало из черного стекла или же стальное. У стекла, он нашел угол поляризации теплоты почти равным углу для света; при стальном же зеркале максимум отражения получался, когда падающие пучки составляли с поверхностью зеркала угол в 15°.

Поляризацию теплоты при простом преломлении ², доказанную ранее Меллони и Форбсом при посредстве слюдяной пластинки, Кноблаух установил также при помощи стеклянных пластинок. Точно так же он исследовал непосредственно *поляризацию теплоты*, происходящую *при двойном преломлении* ³. Во всех этих случаях выведенные законы оказались применимыми к тепловым лучам в такой же мере, как к световым.

Дифракцию тепловых лучей Кноблаух ⁴ определил не только *качественно*, но и *количественно*. Непосредственно измеряя своим линейным термостолбиком распространение тепловых лучей, после их прохождения через узкую щель, на различных расстояниях и при различной ширине щели, он нашел, что это распространение всегда превышает то, которое соответствовало бы прямолинейному очертанию его границ; что оно тем значительнее, чем уже щель, через которую прошли тепловые лучи, чем больше расстояние щели от термоскопа и чем больше ее расстояние от источника тепла. Кноблаух, в прежних своих работах всегда с полным признанием упоминавший предшествующие исследования Меллони, Форбса и др., по отношению к дифракции определенно оставляет за собою полное право на первенство. Правда, Физо и Фуко уже в 1847 г. ⁵ наблюдали в тени теплопрозрачного тела место с повышенной температурой, ограниченное двумя местами пониженной температуры; но он, Кноблаух, доложил соответствующие результаты своей работы Физическому обществу в Берлине еще 7 августа 1846 г., а до этого времени не было опубликовано ни одного прямого наблюдения дифракции теплоты, ни одного опыта, из которого можно было бы хотя бы косвенно заключить о существовании тепловой дифракции ⁶.

¹ „Über die Polarisation der strahlenden Wärme durch Reflexion“, „Pogg. Ann.“, LXXIV, стр. 161.

² „Über die Polaris, d. Wärme durch einfache Brechung“, „Pogg. Ann.“, LXXIV, стр. 170.

³ „Über die Polaris, d. Wärme durch Doppelbrechung“, „Pogg. Ann.“, LXXIV, стр. 177.

⁴ „Über die Beugung der strahlenden Wärme“, „Pogg. Ann.“, LXXIV, стр. 9.

⁵ „Comptes rendus“, XXV, стр. 447, 1847; „Pogg. Ann.“, XXIII, стр. 462. Точно так же при *френелееских зеркалах* и при хроматической поляризации с помощью тонких пластинок Фуко и Физо нашли для интенсивности тепла совершенно такое же распределение, как для интенсивности света. На основании совместных опытов Физо уже в декабре 1847 г. вычислил длины волн некоторых инфракрасных лучей спектра, которые оказались равными 0,001101, 0,001196, 0,001320, 0,001448, 0,001745 и 0,001940 мм.

⁶ „За исключением одного только опыта Маттеуччи („Bibl. Universelle“, L, стр. 1, 1834 и LVII, стр. 74; также „Pogg. Ann.“, XX, стр. 462 и XXXV, стр. 558) над тепловой интерференцией, который, однако, согласно мнению физиков, ознакомившихся с этими исследованиями, не заслуживает никакого дове-

ПОГЛОЩЕНИЕ ТЕПЛА 65

С работами Меллони и Кноблауха совпали во многих отношениях исследования Десена и де-ля-Провостэ над лучистой теплотой, опубликованные ими в это же время. К работам прежних исследователей они прибавили несколько своих открытий. Так, например, в 1849 г. они показали, что *магнит вращает плоскость поляризации тепловых лучей совершенно так же, как световых*¹. Так как в это время в теоретической оптике особенно усердно занимались вопросом о связи между излучением, передачей и поглощением, то оба исследователя занялись после этого изучением тепловых лучей в этом отношении. В другой работе от того же 1849 г.² они установили, что закон «квадратов синусов Малюса, касающийся интенсивности поляризованного света, измененного преломлением или отражением, одинаково применим как к свету, так и к теплу; что формулы Френеля для интенсивности света, прошедшего через прозрачные тела, и для отраженного света остаются верными и для лучистой теплоты и, наконец, что даже законы металлического отражения одинаковы для теплоты и света. В более обширной работе следующего года³, ввиду невозможности достаточно точного измерения интенсивности света, эти исследователи постарались подтвердить формулы Френеля для отражения и преломления сначала на тепловых лучах, а потом уже, с помощью возможно более точных исследований, и на световых лучах и при этом получили ожидавшиеся результаты. Вслед за этим они обратились к проблеме поглощения тепла⁴, разложив ее притом на три отдельные задачи, а именно: во-первых, разрешение вопроса о том, существует ли равенство или пропорциональность между излучательной и поглощательной способностью тепла в телах; во-вторых, исследование зависимости поглощательной способности от рода падающих тепловых лучей и, в-третьих, измерение абсолютной величины поглощения.

Так как последняя задача до того времени была только один раз затронута Лесли, то они начали с нее. До сих пор Десен и Провостэ находились в полном согласии с прочими работниками в той же области; но здесь, в этой трудной области, где речь шла о переносе движений эфира на весомую материю, они впали в большое разноречие со своими предшественниками. Меллони нашел, что каменная соль пропускает одинаково хорошо все тепловые лучи, объяснив незначительные потери тепла при прохождении лучей через соль небольшим диффузным их отражением. Еще в 1853 г. он снова высказал ту же мысль: «Итак, действительно существует такая твердая среда, которая пропускает все виды тепловых лучей с одинаковой легкостью»⁵. В противовес этому Десен и Провостэ пришли к тому выводу⁶, что

рия, — до 1846 г. не было известно ни единого такого наблюдения, из которого можно было бы косвенно сделать заключение о данном явлении".

¹ „Comptes rendus", XXIX, стр. 352.

² Там же, стр. 121.

³ „Ann. de chim. et de phys." (3), XXX, стр. 159, 1850.

⁴ Там же (3), XXX, стр. 431, 1850.

⁵ „Pogg. Ann.", LXXXIX, стр. 84, 1853.

⁶ „Comptes rendus", XXXII, стр. 168, 1853. Frédéric Hervé de la Provostaye (1812—1863)— инспектор училища. Paul Quentin Desains (1817—1885)— профессор физики в Сорбонне.

66 ТЕПЛОПРОЗРАЧНОСТЬ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

поглощение каменной солью светлых тепловых лучей действительно незаметно, но для темных лучей оно доходит до вполне ощутимой величины 0,08 — 0,09. В следующем году Меллони умер, поэтому полемика на время затихла, но затем она снова возобновилась. В 1863 г. Кноблаух¹ присоединился к мнению Меллони, утверждая, что совершенно чистая каменная соль одинаково пропускает все лучи, т. е. вполне теплопрозрачна. Магнус² уже в 1869 г. опять пришел к иному выводу, что каменная соль монотермична, подобно тому как пары ее монохроматичны; другими словами, что, будучи нагрета, эта соль испускает только один вид тепловых лучей, а потому по закону равенства излучения и поглощения она должна поглощать только этот вид лучей. Таким образом, большая теплопрозрачность каменной соли объясняется не тем, что она обладает ничтожно малой поглощательной способностью, а тем ее свойством, что она поглощает только определенный род лучей и что именно эти лучи большинством тел, при обыкновенном их нагревании, не испускаются. Кноблаух на основании новых своих опытов решительно не согласился с этим мнением Магнуса³, и на этом вопрос остался пока неразрешенным; представляется вероятным, что как опыты Кноблауха, так и опыты Магнуса содержали в себе значительные источники ошибок.

Исследования по лучистой теплоте содержат в себе много характерного. Исходя из идеи о тождестве светового и теплового эфира, можно было бы легко вывести все общие их свойства из волновой теории лучистой теплоты и из вытекающего отсюда понятия тепловых цветов. Но так как эта гипотеза не была еще достаточно твердо обоснована⁴, то методически было совершенно правильно установить указанные свойства тепловых лучей только на основании опыта, пользуясь при этом гипотезой тепловых цветов лишь как руководящей идеей, которую, и следовало проверить затем на основании полученных результатов. В этом смысле данные исследования всегда представляли большой *теоретический интерес*, хотя они и не обещали ничего особенно нового или поразительного. Но после того как в сороковых годах на основании этих именно исследований было признано тождество светового и теплового эфира, эти работы, конечно, утратили этот общий

¹ „Pogg. Ann.“, CXX, стр. 177, 1863.

² Там же, CXXXVIII, стр. 333, 1869.

³ Там же, CXXXIX, стр. 150, 1870.

⁴ В „Fortschritten der Physik im Jahre 1846“ (издании Берлинского физического общества) в отзыве о работе Лорана встречается (т. II, стр. 166) следующее место: „Она построена на недостаточно еще твердо установленной гипотезе, что свет и лучистая теплота вызываются движениями в одной и той же среде“. Наоборот, Меллони на основании своих опытов уже в 1842 г. пришел к убеждению о тождестве светового и теплового эфира, хотя раньше он считал этот вопрос еще под сомнением (см. 1-й выпуск этой части). Он говорит („О тождестве различных световых, тепловых и химически действующих лучей, „Comptes rendus“, XV, стр. 454; „Pogg. Ann.“, VII, стр. 300): „Свет, тепло и химическое действие суть проявления колебаний эфира, составляющих солнечные лучи... Правда, световые лучи отличаются от всех других своею видимостью, но это свойство проистекает из чисто случайного качества... Теплота, возникающая в телах, на которые попадают эти лучи, заключается в известной величине движения, сообщаемого весомым массам колебаниями эфира“.

ТЕПЛОПРОЗРАЧНОСТЬ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ 67

интерес. Но зато теперь на первый план выступила задача определить *тепловые цвета* в отдельности для различных тел и, прежде всего для жидкостей и газов, точнее исследовать их *поглощательную способность* по отношению к теплоте, так как от этой способности в основном зависят тепловые цвета, а для ее исследования в этом направлении до того времени было еще сделано очень мало. Поэтому в 1855 г. Р. Франц опубликовал ряд работ по вопросу о теплопрозрачности цветных жидкостей ¹. В 1862 г. Тиндаль *открыл большую прозрачность для темных тепловых лучей раствора йода в сернистом углероде* ²; Баретт *нашел то же для хлороуглерода*. Более трудными вследствие незначительности своего действия, но особенно важными по своему значению ввиду влияния земной атмосферы на солнечные лучи были исследования над *теплопрозрачностью газов*. Р. Франц опубликовал подобные измерения в вышеупомянутых своих работах, но более детальным точным изучением этого вопроса мы обязаны работам Тиндаля ³ и Магнуса ⁴, хотя в полученных ими результатах тоже встречаются многочисленные разногласия, порою даже прямые противоречия. Но, во всяком случае, оба эти физика одинаково установили, что *поглощение тепла у простых газов очень мало* и что оно значительно возрастает только у сложных по своему составу газов. К числу разноречий принадлежит случай влажного воздуха: Тиндаль нашел, что последний поглощает тепло в значительной степени, по Магнусу же водяной пар почти вполне теплопрозрачен. Этот вопрос долгое время оставался неразрешенным, причем каждая из этих точек зрения находила своих защитников и противников; однако в конце концов Магнусу удалось доказать по меньшей мере вероятность предположения, что наблюдаемое Тиндалем поглощение тепла вызывалось не водяным паром, а тонким осадком водяных капель, образовавшимся на стенках прибора, который, конечно, очень сильно поглощает тепло ⁵.

Под влиянием той же идеи о тождестве световых и тепловых движений и, в частности, исходя из представления о поверхностях волн, стали также исследовать особенности *распространения тепла в кристаллизованных веществах*. С этой целью, А. де-Сенармон ⁶ стал изготовлять из исследуемых кристаллов тонкие, большей частью круглой формы пластинки равной толщины, вырезанные параллельно кристаллографическим осям. Через отверстие в середине пластинок проходила

¹ „Pogg. Ann.“, XCIV, стр. 377 и CI, стр. 46. R. Franz (родился в 1827 г.) — преподаватель гимназии в Берлине.

² Там же, CXXIV, стр. 36.

³ „Philosophical Magazine“ (4), XXII, стр. 377; XXV, стр. 203; XXVI, стр. 36; XXXII, стр. 118; „Pogg. Ann.“, CXIII, стр. 1; CXIV, стр. 632; CXVI, стр. 1 и 289.

⁴ „Pogg. Ann.“, CXIV, стр. 635; CXVIII, стр. 575; CXXI, стр. 174 и 186; наконец, CXXX, стр. 207.

⁵ Г. Вильд (H. Wild, „Pogg. Ann.“, CXXIX, стр. 57) на основании опытов, произведенных по методу Тиндаля, пришел к тем же результатам, что и последний. Г. Буфф (H. Buff, „Pogg. Ann.“, CLVIII, стр. 205) на основании собственных опытов пришел к тем же результатам, что и Магнус.

⁶ „Comptes rendus“, XXV, стр. 459 и 707, 1847; „Ann. de chim. et de phys.“ (3), XXI, стр. 457 и XXII, стр. 179; „Pogg. Ann.“, LXXIII, стр. 191; LXXIV, стр. 190; XXV, стр. 50 и 482, 1848.

68 ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ КРИСТАЛЛОВ

серебряная трубочка, через которую пропускался нагретый воздух. Поверхности пластинок покрывались воском; таяние воска и указывало на ход тепла. Исследовав большое количество тел, Сенармон пришел к следующим выводам: 1) во всех кристаллах правильной системы тепло проводится по всем направлениям одинаково; изотермическими поверхностями здесь являются шаровые поверхности; 2) во всех кристаллах II и VI систем теплопроводность в направлении кристаллографической оси имеет максимальное или минимальное значение, во всех же прочих направлениях она одинакова; здесь изотермические поверхности имеют вид поверхностей эллипсоидов вращения, удлинённых или приплюснутых по направлению оси симметрии; 3) в кристаллах III системы изотермические поверхности образуют неравноосные эллипсоиды, оси которых совпадают с ребрами прямоугольной призмы; 4) во всех кристаллах IV системы повторяется то же самое, но только здесь одна из осей параллельна кристаллографической оси, положение же другой оси не может быть наперед определено; 5) в кристаллах V системы изотермы суть поверхности неравноосных эллипсоидов, положение осей которых не может быть определено на основании какого бы то ни было априорного закона. Вскоре затем Сенармон показал, что и подвергнутые сжатию стекла ведут себя в смысле теплопроводности как кристаллы. Результаты, полученные Сенармоном, были тотчас же подтверждены Био и Дюгамелем, членами комиссии, назначенной для рассмотрения его работы ¹, а также Кноблаухом ² и др. Позднее Э. Жаннета ³ и Ф. Ланг ⁴ еще показали, что в одноосных кристаллах почти всегда оптические поверхности волн и изотермические поверхности настолько соответствуют друг другу, что кристаллы одновременно бывают оптически и термически либо положительными, либо отрицательными.

Сам Сенармон по поводу найденного им соответствия между положениями оптических осей и теплопроводностью говорит следующее: *«Являются ли эти аналогии только кажущимися, обязанными своим происхождением лишь симметрии форм, без всякой иной первоначальной связи между явлениями, или же они являются следствиями одного и того же закона, в котором варьируют лишь постоянные? Вот вопросы, на которые нельзя ответить в настоящее время. Но как бы там ни было, следует уже теперь считать вполне доказанным, что коэффициенты проводимости, упругости, расширения и преломления изменяются в кристаллических средах в зависимости от направления; не менее ясно, что молекулярное строение тел производит на эти различные группы явлений влияния одного и того же порядка, которые, вероятно, было бы очень легко связать ⁵ между собой, если бы мы знали законы этого строения».*

¹ „Comptes rendus“, XXV, стр. 829.

² „Pogg. Ann.“, XCIII, стр. 161, 1854.

³ „Ann. de chim. et de phys.“ (4), XXIX, стр. 5, 1873.

⁴ „Pogg. Ann.“, CXXXV, стр. 29, 1868.

⁵ „Pogg. Ann.“, LXXV, стр. 498—499 и 500—501, 1848. Henri Hureau de Sénarmont (1808—1862)—профессор минералогии в École des Mines и экзаменатор физики в Парижской политехнической школе.

ОБРАЗОВАНИЕ ТЕПЛА ПРИ ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ 69

Возникновение новых воззрений на сущность силы выразилось, между прочим, в это время в многообразных попытках определить *количество тепла, образующегося при известных химических соединениях*, и, таким образом, косвенно свести химические силы к определенной мере. Для получения работы на земле мы пользуемся только тремя источниками силы: живую силу текучей воды и движущегося воздуха, химическими силами горючих органических тел и мускульной силой живых существ. Силы первого рода были исследованы с давних пор, и их действие было известно, но силами второго и третьего рода физикам, интересовавшимся вопросом о сохранении энергии, следовало еще особо и внимательно заняться. К исследованию теплоты, развивающейся при химических процессах, побуждала, кроме того, и *практическая важность этих тепловых источников*. Из этих последних побуждений уже Лавуазье, Крауфорд, Румфорд, Дальтон и другие сжигали определенные количества горючих веществ в калориметрах и, таким образом, измеряли теплоту их сгорания, но, преследуя чисто практические цели, они не столько занимались измерениями абсолютных количеств тепла, сколько установлением относительных их количеств, определением наилучшего горючего материала¹. Более точные результаты были получены лишь Дюлонгом² в 1838 г., а затем, спустя десятилетие, — Эндрюсом³, Фавром и Зильберманом⁴, которые стали выражать точно, в тепловых единицах, количества теплоты, получавшиеся при соединении определенных весов или определенных объемов веществ. Все полученные ими результаты очень сильно расходились между собою, но этих расхождений было трудно избежать при значительности источни-

¹ По поводу этих старых работ — см. *Gehler, Physikalisches Wörterbuch*, 2 издание, X, стр. 236—396.

² „Comptes rendus”, VII, стр. 871, 1838 г. (посмертная статья); „Pogg. Ann.”, XLV, стр. 461.

³ Выделение теплоты при соединении кислот и оснований, „Trans. Irish Acad.”, XIX, 1843; „Pogg. Ann.”, LIV, стр. 208; то же — при получении металлического хлора, брома и йода, „Trans. Irish Acad.”, XIX; „Pogg. Ann.”, LIX, стр. 428; температурные изменения при замещении оснований, „Phil. Trans.”, стр. 21, 1844; „Pogg. Ann.”, LXVI, стр. 31; образование теплоты при соединении тел с кислородом и хлором, „Philosophical Magazine”, XXXII; „Pogg. Ann.”, LXXV, стр. 27 и 244; образование теплоты при замещении металлов, „Phil. Trans.”, 1848, стр. 91; „Pogg. Ann.”, LXXXI, стр. 73.

⁴ „Recherches sur les quantités de chaleur dégagées dans les actions chimiques et moléculaires”, „Ann. de chim. et de phys.” (3), XXXIV, стр. 357 и XXXVI, стр. 5, 1852; XXXVII, стр. 406, 1853. Также в „Comptes rendus”, XX, стр. 1565; XXI, стр. 944; XXVI, стр. 595; XXVII, стр. 56; XXVIII, стр. 627; XXIX, стр. 449. В „Comptes rendus”, XXVIII, стр. 666, 1848, комиссия Парижской академии наук (Реньо, Дюма, Пулье и Гэ-Люссак) сообщает, что на тему „Теория теплоты, выделяющейся при химических соединениях” поступило 6 работ, из которых, однако, ни одна не заслуживает большой премии. Фавр и Зильберман получили за свои работы 1500 фр., а за мемуар (Эндрюса), который уже был напечатан в „Trans. Irish Acad.”, было выплачено 1000 фр. Thomas Andrews (1813—1885) — сначала практический врач, потом профессор химии в Queen's College в Белфасте. Pierre-Antoine Favre (1813—1880) произвел приведенные выше работы вместе со своим ассистентом Зильберманом в Париже в Conservatoire des Arts-et-Métiers, потом был профессором химии при медицинском факультете в Париже и, наконец, профессором химии в Марселе. Johann Theobald Silbermann (1806—1865), — хранитель музея Conservatoire des Arts-et-Métiers в Париже.

70 ЖИВОТНАЯ ТЕПЛОТА

ков ошибок в их приборах. Кроме того, ни один из этих опытов не давал возможности, хотя бы приближенно, определять ту долю химической силы, которая шла не на повышение температуры, а на *внутреннюю работу*. Поэтому полученные ими числа, хотя в отдельности и представляли известную ценность, но не могли привести к общим надежным заключениям о количественной стороне превращений, о связи между химическими силами и теплом. То же самое, хотя в более ограниченной степени, следует сказать и об обширных работах И. Томсена¹ и М. Бертелло², охватывающих всю область термохимии. Так, установленное уже в 1840 г. Гессом и соответствующее закону сохранения энергии положение, согласно которому *«количество тепла, соответствующее какому-либо химическому процессу, остается неизменным, независимо от того, протекает ли этот процесс отдельными фазами или же сразу»*, было подтверждено эмпирически и объяснено теоретически. Однако идущее дальше этого положение Бертелло, согласно которому *каждое химическое превращение, совершающееся без посредства посторонней энергии, стремится к образованию такого тела или такой системы тел, для которых количество образующегося тепла является максимальным*, нельзя было считать вполне обеспеченным от многочисленных возражений.

Эта невыясненность вопроса о теплоте, выделяющейся при химических процессах, отразилась и на исследованиях *источников мускульной силы у животных и человека*. Согласно закону сохранения силы животная теплота, как и работоспособность животных, должны проистекать из одного и того же источника — из пищи животных. Однако для точного сравнения действующих здесь причин и вызываемых ими действий недоставало еще опытных основ, измерения механической работоспособности животных, определения развиваемого ими количества тепла и, наконец, установления термических эквивалентов принятой пищи. Поэтому основоположники закона сохранения энергии могли лишь обосновать вероятную применимость этого закона к органическому миру, но не имели возможности этого твердо доказать; поэтому-то физиология долгие, чем какая-либо иная дисциплина, представляла собою поле для самых фантастических суждений по вопросу об образовании тепла и мышечной силы. Дюлонг³ около 1815 г. вычислил количество теплоты, исходя из продуктов дыхания, и получил лишь 0,723 тепла, наблюдаемого в теле. Дебре⁴ в 1823 г. получил вместо этого числа — 0,811. Гельмгольц еще в 1847 г. констатировал, что полученные до того времени результаты дают для первого количества теплоты величину, на $\frac{1}{10}$ — $\frac{1}{20}$ меньшую второй величины. Но при

¹ „Thermochemische Untersuchungen“, 4 тома. Leipzig; также „Pogg. Ann.“, начиная с LXXXVIII, 1853, в ряде статей. Hans Peter Jorgen Thomsen (родился в 1826 г.) — профессор химии в Копенгагене.

² „Mécanique chimique fondée sur la Thermochemie“, 2 тома, Paris 1879; также в „Ann. de chim. et de phys.“ (4) в ряде статей, начиная с тома VI, 1865.— Marcellin Pierre Eugène Berthelot (1827—1907)—знаменитый французский химик, профессор химии в Париже.

³ „Ann. de chim. et de phys.“, I, 1816.

⁴ Там же, XXVI, 1824; увенчано Парижской академией наук в 1823 г. César Mansuète Despretz (1792—1863) — профессор физики в Сорбонне.

ОПЫТЫ РЕНЬО 71

этом Гельмгольц отметил, что исчисленные величины теплоты сгорания продуктов дыхания, во всяком случае, не соответствуют в точности тепловым эквивалентам принятой пищи, что противоречие этих результатов началу сохранения энергии может быть лишь кажущимся и что эти результаты, при незначительности указанного расхождения, скорее можно рассматривать как подтверждение упомянутого начала ¹.

На это же время приходится и весьма совершенные с экспериментальной стороны, выполненные Реньо *измерения тепловых постоянных, удельной теплоемкости, теплоты плавления и теплоты испарения, упругости газов и паров при различных температурах и т. д.*, — измерения, важные не столько в теоретическом, сколько в практическом отношении. Однако согласно общему духу и специальному плану нашей работы мы не можем здесь входить в подробное описание измерений Реньо, хотя они и с методической стороны интересны и чрезвычайно поучительны. Мы ограничимся лишь указанием большого сборника его работ, в котором Реньо собрал все свои прежние важнейшие физические исследования, и который до настоящего времени рассматривается физиками как официальный источник для большинства постоянных в учении о теплоте. Сборник этот носит заглавие: «Relation des expériences entreprises par ordre de M. le Ministre des Travaux publics et sur la proposition de la Commission centrale de machines à vapeur, pour déterminer les principales lois et les données numériques qui entrent dans le calcul des machines à vapeur» («Сообщение об опытах, предпринятых по распоряжению министра общественных работ и по предложению центральной комиссии паровых машин, для определения основных законов и численных величин, входящих в исчисление паровых машин»). Он появился в двух частях, в XXI и XXVI тт. Мемуаров Парижской академии наук за 1847 и 1862 гг.

Первый отдел включает в себя на 760 страницах десять следующих, большею частью уже ранее опубликованных статей: 1) «Sur la dilatation des fluides élastiques» ² («О расширении упругих жидкостей»); 2) «Sur la détermination de la densité des gaz» ³ («Об определении плотности газов»); 3) «Détermination du poids du litre d'air et de la densité du mercure» ⁴ («Определение веса литра воздуха и плотности ртути»); 4) «De la mesure des températures» ⁵ («Об измерении температур»); 5) «De la dilatation absolue du mercure» («Об абсолютном расширении ртути»); 6) «Sur la loi de la compressibilité des fluides

¹ „Die Fortschritte der Physik im Jahre 1845“, I, стр. 353; „Über die Erhaltung der Kraft“, стр. 70, 1847.

² „Ann. de chim. et de phys.“ (3), IV и V, 1842; „Pogg. Ann.“, LV, стр. 391 и 557; LVII, стр. 115.

³ „Ann. de chim. et de phys.“ (3), XIV, 1845 г.; „Pogg. Ann.“, LXV, стр. 395.

⁴ «Pogg. Ann.», LXXIV, стр. 202. 1 л атмосф. воздуха при 0° С и 760 мм давления весит 1,293187 г.

⁵ Частично в „Pogg. Ann.“, VII, стр. 199. Водород и углекислота в интервале от 0 до 350° следуют закону расширения и потому дают наиболее совершенные термометры; ртуть расширяется не столь равномерно. Термоэлектрические приборы совсем не годятся для измерения температур, так как 1° тепла дает в зависимости от температуры совершенно различную электродвижущую силу.

72 ОПЫТЫ РЕНЬО

élastiques»¹ («О законе сжимаемости упругих жидкостей»); 7) «De la compressibilité des liquides et en particulier de celle du mercure» («О сжимаемости жидкостей и в частности — ртути»); 8) «Des forces élastiques de la vapeur d'eau aux différentes températures»² («Об упругих силах водяного пара при различных температурах»); 9) «Sur la chaleur latente de la vapeur aqueuse á saturation sous diverses pressions»³ («О скрытой теплоте насыщенного водяного пара при различных давлениях»); 10) «Sur la chaleur spécifique de l'eau liquide aux diverses températures»⁴ («Об удельной теплоемкости воды при различных температурах»). Вторая часть на 915 страницах содержит следующие три исследования: 1) «Mémoire sur la chaleur spécifique des fluides élastiques» («Об удельной теплоемкости упругих жидкостей»); 2) «Mémoire sur les forces élastiques des vapeurs» («Об упругих силах пара»); 3) «Mémoire sur les chaleurs latentes des vapeurs sous diverses pressions» («О скрытой теплоте паров под различными давлениями»).

После этих больших работ Реньо еще раз вернулся к вопросу о расширении газов и в работе, представленной Парижской академии наук 11 октября 1869 г., отдельные части которой относятся, впрочем, еще к началу 50-х годов, определил теплоту, затрачиваемую или выделяемую газом при изменениях его объема. При этом на основании своих опытов он пришел к вполне обоснованному выводу, что многие тепловые действия, приписываемые обычно трению или же испарению, вызываются в большей мере изменениями объема тела, причем, прежде всего, указал на нагревание огнестрельных орудий и замерзание вытекающей жидкой угольной кислоты⁵.

В это же время обратила на себя вновь большое внимание другая очень старая проблема из учения о теплоте, не столько в силу ее отно-

¹ „Comptes rendus“, XXIII, стр. 787; „Pogg. Ann.“, LXVII, стр. 534. Закон Мариотта для постоянных газов тоже не вполне точен; так, например, для

$$\frac{V_0 : V_1}{P_1 : P_0}$$

атмосферного воздуха больше, а для водорода меньше единицы.

² „Ann. de chim. et de phys.“ (3), XI; „Pogg. Ann.“, LXV, стр. 360; дополнительный том II, стр. 119. Для того чтобы получить эмпирическую (интерполяционную) формулу для вычисления упругости, Реньо, следуя предложению Био, принимает упругость пропорциональной сумме $a^t + b^t$. Магнус („Pogg. Ann.“, LXI, стр. 225, 1844 г.) для той же цели применяет предложенную уже Августом (там же, XIII,

стр. 122) и Штрельке (там же, LVIII, стр. 334) формулу $e = ab^{\frac{t}{\gamma+t}}$ и

находит $e = 4,525 \text{ мм} \cdot 10^{\frac{7,4475t}{231,69+t}}$. Гольцман дает („Pogg. Ann.“, LXVII, стр.

382) $\log \frac{P}{P_0} = \frac{5,2555t}{336,22+t}$ формулу, которая близко подходит к магнусовской формуле и которую он защищает против Реньо. „Fortschritte der Physik im Jahre 1845“ (т. I, стр. 90—98) определяют число формул, предложенных для исчисления упругости водяного пара, солидным числом 40.

³ „Pogg. Ann.“, XXVIII, стр. 196 и 523. Скрытая теплота водяного пара не является постоянной величиной; ее следует положить равной $606,5 + 0,305t$.

⁴ „Pogg. Ann.“, LXXIX, стр. 241.

⁵ „Comptes rendus“, LXIX, стр. 780, 1869. Henri Victor Regnault (1810—1878)— профессор физики и химии в Париже и директор Севрской фарфоровой фабрики.

ЯВЛЕНИЕ ЛЕЙДЕНФРОСТА 73

шения к тогдашнему ходу научного развития, сколько благодаря ревности и энтузиазму, внесенному в нее одним физиком, который, правда, нашел себе поддержку во вновь воскресшем интересе ко всем проблемам теории теплоты. Речь идет о так называемом *опыте Лейденфроста*. После самого Лейденфроста тем же явлением занимались многие физики, как Цинглер, Ламберт, Кастнер и особенно детально Клапрот, которые, однако, пришли только к тому отрицательному результату, что скорость испарения не находится, как это принимал Лейденфрост, в отношении обратной пропорциональности к температуре. Объяснение этого явления дал впервые Румфорд¹, указавший, что теплота, попадающая на каплю, частью отражается от ее гладкой поверхности, частью же проходит через каплю без всякого поглощения. Он же впервые показал, что температура капли невысока, вылив из раскаленного тигля каплю себе на руку, причем тепло, правда, ощущалось, но ожога не вызывало. Дзберейнер², доведя каплю в тигле до размера лесного ореха, погрузил в нее термометр и нашел ее температуру от 99 до 101° С, что, конечно, выше действительной, так как предохранить термометр от прямого лучеиспускания со стороны стенок тигля было невозможно. Такая сравнительно низкая температура сделала вполне понятной медленность ее испарения, форму же капли Дж. Перкинс объяснил главным образом отталкивательной силой теплоты. К такому заключению он был приведен интересным наблюдением, сделанным в 1827 г.³ В машине высокого давления лопнул с большим шумом котел, и, тем не менее, машина продолжала безостановочно работать. Лишь после того как топку погасили, и котел охладился, вода со страшным шипением устремилась из него через трещину. Отсюда Перкинс сделал вывод, что сильно нагретый металл, благодаря отталкивательной силе тепла, отталкивает от себя воду и даже водяной пар, по меньшей мере, на расстояние $\frac{1}{16}$ дюйма, так что они не соприкасаются друг с другом. К подобному же заключению об отталкивательном действии теплорода на весомую материю раньше Перкинса пришел Либри, который наблюдал, что на накаленной металлической проволоке капля удаляется от накаленного места. Однако вскоре пришли к убеждению, что данное явление, равно как и все подобные, объясняется не отталкивательной силой теплорода, но скорее действием течения образующегося пара. В силу этого мысль об отталкивательном действии теплоты на расстоянии была почти оставлена, по крайней мере, по отношению к явлению Лейденфроста, и шарообразную форму капли стали объяснять тем, что теплота не только ослабляет сцепление между частицами в телах, но еще в большей степени — сцепление между водою и стенками тигля, вследствие чего сцепление между частицами воды проявляется беспрепятственно, и капля принимает форму шара⁴.

¹ „Mém. sur la chaleur", Paris 1804, стр. 93; „Gilbert's Ann.", XVII, стр. 33, 1804.

² „Schwelgger's Journal", XXIX, стр. 43, 1820; „Gilbert's Ann.", LXXII, стр. 211. [oh. Wolfg. Döbereiner (1780 — 1849) — профессор химии в Йене.

³ „Pogg. Ann.", XII, стр. 316, 1827. Яс. Perkins (1766—1849) — гражданский инженер в Лондоне.

⁴ Какие надежды возлагались на это открытие, т. е. на прекращение прилипания (или притяжения между телами), можно видеть из следующих слов

74 СФЕРОИДАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ МАТЕРИИ

Такое объяснение давало, во всяком случае, возможность понять образование капли в тигле; но зато вновь возникли сомнения относительно причины ее низкой температуры. Бодримон¹ высказал предположение, что пар поднимает жидкость в тигле, а притекающая к ней лучистая теплота нейтрализуется охлаждением, вызываемым испарением, Н. В. Фишеру показалось², будто жидкость в раскаленном тигле не только испаряется, но и разлагается химически, и он высказал предположение, что вся притекающая к капле теплота идет на это разложение.

Несмотря на все это, Бутиньи³ в 1840 г. снова пришел к убеждению, что все предположенные до того времени объяснения явления Лейденфроста недостаточны. Бутиньи сам сделал много новых и интересных наблюдений и сильно расширил круг наших знаний в области этих явлений. Бутиньи показал, что явление Лейденфроста наблюдается, кроме воды, и на многих других жидкостях, причем в некоторых случаях при гораздо более низких температурах, чем у воды⁴. Для последней эта температура соответствует 200°, для алкоголя только 134°, для сернистой кислоты 100°, а для эфира даже 61°. При этом температура самой сернистой кислоты держалась на —10°,5 С, так что при ее посредстве Бутиньи удалось заморозить воду в раскаленном тигле. Кроме того, это явление может быть воспроизведено не только на раскаленных металлических поверхностях, но и на жидкостях; так, например, с эфиром оно может быть получено на воде, ртути или на масле, если только нагреть последние до 54° С. *Бутиньи признал невозможным объяснить все свои наблюдения только тремя известными агрегатными состояниями материи и счел необходимым для объяснения явления Лейденфроста допустить существование четвертого состояния, которое он назвал сфероидальным (état sphéroïdal).* Это четвертое агрегатное состояние должно находиться между твердым и жидким состоянием и характеризоваться более значительной силой отталкивания на расстоянии, а также способностью целиком отражать теплоту; поэтому оно должно вызывать в телах особую силу сопротивления против внешних воздействий. «При помощи следующего опыта, — пишет Бутиньи в 1849 г.⁵, — я надеюсь доказать, что в сфероидальном состоянии тела бывают ограничены особым слоем вещества, который связывает молекулы таким образом, что его можно сравнить с твердой и прозрачной оболочкой бесконечно малой толщины и очень боль-

Берцелиуса („Ver. über d. Fortschr. d. Physik und Chemie", VI, стр. 26, 1826): „Если подтвердится, что тяготение тел друг к другу может быть каким-либо образом видоизменено температурой, то какие горизонты открываются для догадок об отношении между небесными телами и их относительными температурами".

¹ „Ann. de chim. et de phys." (2), XLI, стр. 319, 1836.

² „Pogg. Ann.", XIX, стр. 514 и XXI, стр. 163, 1830.

³ „Comptes rendus", X, стр. 397; „Pogg. Ann.", LI, стр. 130, 1840.

⁴ „Ann. de chim. et de phys." (3), IX, стр. 350. Также в „Comptes rendus", начиная с 1840 г., — в ряде статей. Последние собраны в сочинении „Études sur les corps à l'état sphéroïdal", 3 издание, Paris 1857.—Р. Н. Boutigny (1798—1884) — аптекарь в Эврэ. потом химик в Англии.

⁵ „Comptes rendus", XXIX, стр. 473, 1849.

ТЕОРИЯ СФЕРОИДАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ 75

шой упругости»¹. Надежным доказательством в пользу такого мнения он считает наблюдение, что вода, алкоголь и другие жидкости удерживаются на раскаленной спирали из платиновой проволоки, между тем как при обыкновенной температуре эти жидкости стекают со спирали. Однако Г. Буфф отверг это доказательство другими наблюдениями, согласно которым вода и при обыкновенной температуре удерживается на сетке из флера.

Поэтому физики сохранили название «сфероидальное состояние» как удачно выбранное, но едва ли кто-либо, кроме Бутины, связывал с ним представление об *особом агрегатном состоянии* материи. Наиболее вероятным считали предположение, что капля в сфероидальном состоянии лежит на собственных своих парах, вследствие чего прерывается прямое соприкосновение, а вместе с тем и непосредственная теплопроводность и сцепление между каплей и поверхностью, на которой она лежит, и частица жидкости, силою собственного свободно действующего сцепления, принимает форму капли. Чтобы доказать существование промежутка между каплей и ее основанием, Поггендорф² пропустил через тигель и жидкость гальванический ток и установил, что ток прерывается, как только жидкость приходит в сфероидальное состояние. В. Пьерр установил, что, во всяком случае, сопротивление в цепи достигает при этом огромных размеров. Тиндаль³ добился того, что можно было непосредственно видеть промежуток между каплей и тиглем; для этого он пускал каплю чернил на выпуклую поверхность раскаленного тигля и затем помещал между каплей и тиглем светящуюся раскаленную платиновую проволоку. Хотя при всем том незначительность теплопроводности между каплей и ее основанием оставалась загадочной, и некоторые другие стороны сфероидального состояния оставались все еще сомнительными и не вполне выясненными, но

¹ Там же, стр. 675, 1860. Здесь Бутины систематически избегает выражения сфероидальное состояние *жидкостей*", так как в этом состоянии материя уже не является жидкостью.

² „Pogg. Ann.", LII, стр. 539, 1841.

³ „Philosophical Magazine" (4), X, стр. 350, 1855. Буфф, который высказывался против существования промежутка между каплей и тиглем и пытался объяснить форму жидкости ослаблением сцепления, отнес результат опыта Поггендорфа за счет незначительности поверхности соприкосновения между тиглем и каплей. Но Ш. Кл. Персон уже в 1842 г. писал („Comptes rendus", XV, стр. 492; „Pogg. Ann.", LVII, стр. 292): „Я придумал прибор, при помощи которого можно смотреть сквозь промежуток между поверхностью и жидкостью. Промежуток этот составляет незначительную долю миллиметра; можно заметить, что в зависимости от температуры он то расширяется, то суживается" (стр. 293). Иос. Бергер (преподаватель во Франкфурте-на-Майне), на основании обширных экспериментальных исследований, дает в 1863 г. такое определение („Pogg. Ann.", CXIX, стр. 594):

„Тело в сфероидальном состоянии есть такое тело (испаряющееся или газообразующее), к которому теплота притекает через его собственный пар (или газ)... Поэтому приток тепла ограничен, испарение происходит только с поверхности, и настоящее кипение становится невозможным... Сфероидальное состояние исчезает, как только упругость пара становится недостаточной для того, чтобы воспрепятствовать непосредственному соприкосновению и передаче тепла между телом, вызывающим и принимающим сфероидальное состояние" (стр. 636).

76 МЕХАНИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ТЕПЛОТЫ ДЖОУЛЯ

вследствие безрезультатности дальнейших исследований интерес к этому явлению постепенно ослабел, и со времени 60-х годов в данной области уже не сделано ничего достойного упоминания¹.

Все перечисленные до сих пор исследования по теплоте более или менее отвлекались от умозрений по вопросу *о сущности теплоты* в телах, а собственное развитие их не приводило к этому вопросу. Иное представляли собой все те работы, которые были посвящены исследованию *механических действий* тепла, в особенности определению *механического эквивалента теплоты*. Уже для первых исследователей, открывших механический эквивалент, было ясно, что то, что может быть неограниченно превращено в механическую работу, ни в коем случае не может быть веществом, а должно быть тоже рассматриваемо как некоторое явление движения, и что, следовательно, представление Карно о силе тепла как о силе некоего потока с известным падением должно быть оставлено и переход тепла из одного тела в другое следует рассматривать только как передачу движения. Однако это заключение давало лишь фундамент для теории теплоты, самое же здание предстояло еще построить. В самом деле, если даже и было признано, что теплота есть движение, оставалось еще решить, что именно движется в нагретом теле, заключенный ли в нем эфир или же частица самого весомого вещества, и каков вид этого движения. Открытие механического эквивалента теплоты несколько не уменьшило трудностей этих задач и поэтому понятно, что новая теория теплоты могла развиваться лишь медленно.

Майер мало занимался вопросами теории теплоты, — в этой области Джоуль с его склонностью к более ограниченному кругу вопросов сделал несравненно больше. Выше было уже отмечено, что в своей работе *«О тепловых действиях магнетизма»* он пришел к убеждению, что теплота, развиваемая током, *не переносится только из одной части прибора в другую, а действительно развивается* в соответствующей части проводника тока. В прибавлении к этой работе² он даже идет дальше, утверждая, *что теплота, развивающаяся при химических соединениях, определяется «силою, затрачиваемой при падении атомов»*; *что скрытую теплоту можно сравнить с заведенною часовою пружиною и что водород и кислород, если бы их можно было соединить в жидком виде, дали бы при соединении меньшие теплоты, чем при их соединении в газообразном состоянии, так как в первом случае «атомам пришлось бы пробегать при соединении меньшие пространства»*. В прибавлении к следующей работе *«О развитии тепла при электролизе воды»*³ он считает *теплоту плавления* механической силой, необходимой для преодоления сцепления между частицами твердого тела,

¹ Хотя сфероидальное состояние само по себе еще не было вполне объяснено, тем не менее, оно было использовано для объяснения других загадочных явлений. Так, взрывы паровых котлов, безнаказанное погружение руки в расплавленный металл и другие явления удачно связали со сфероидальным состоянием.

² „Das mechanische Wärmeäquivalent“, стр. 38—40.

³ „Mem. of the Lit. and Phil. Soc. of Manchester“ (2), VII, стр. 87. Прибавление датировано 20 февраля 1844 г. „Das mechanische Wärmeäquivalent“, стр. 53—55.

МЕХАНИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ТЕПЛОТЫ ДЖОУЛЯ 77

а теплоту испарения эквивалентом силы, необходимой для преодоления связи между частицами жидкости, а также атмосферного давления. Для того чтобы создать, как он выражается, теорию теплоты, более естественную, чем волновая гипотеза, он обращается к гипотезе Фарадея, согласно которой все атомы окружены равными количествами электричества, и допускает, что все эти электрические, атмосферы вращаются с очень большою скоростью вокруг своих атомов. Тогда момент атмосферы соответствует количеству тепла, а скорость наружных слоев — температуре. Таких же воззрений придерживается Джоуль в своей работе «Об изменениях температуры путем разрежения и сжатия воздуха», прибавляя только, что для объяснения лучистой теплоты необходимо еще допустить, что вращающиеся электрические атмосферы обладают способностью, в зависимости от обстоятельств, возбуждать в эфире в большей или меньшей степени изохронные волнообразные движения. Вместе с тем он указывает на невозможность сохранить теорию паровых машин Карно и Клапейрона, «так как она приводит к заключению, что при нецелесообразном устройстве приборов живая сила может быть уничтожена». Работу способно производить не падение теплоты от более теплого тела к более холодному, равным образом и тепло, освобождающееся в конденсаторе, не может быть равно теплу, сообщенному котлу очагом, — первое должно быть меньше второго, и именно в точном соотношении с эквивалентом произведенной механической силы.

Эти воззрения Джоуля на сущность тепла, повторно изложенные им также в упомянутом выше большом сочинении 1850 г., постарался развить и облечь в математическую форму Ранкин в ряде больших работ, начиная с 1850 г.¹ По его мнению, каждый атом материи состоит из ядра, или центральной физической точки, окруженной упругой атмосферой, которая удерживается в своем положении притягательными силами, направленными к центру. Состоит ли при этом ядро, или физическая центральная точка, из уплотненного до максимальной степени вещества атмосферы или же оно состоит из отличного от него вещества, остается совершенно невыясненным. Агрегатное состояние тела зависит от соотношения между упругой силой его атомных атмосфер и взаимодействием самих атомов. Упругая сила теплоты возникает благодаря вращениям или вибрациям упругих атмосфер атомов, и количество тепла в теле есть живая сила этих вращений или вибраций. Температура же является функцией отношения квадрата вращательной скорости к упругости атмосфер. Для того чтобы эту теорию связать с теорией света и лучистой теплоты, следует еще принять, что среда, в которой распространяются эти последние, состоит из атомных ядер, которые вибрируют независимо или почти независимо от своих атмосфер. Поглощение света и тепла является тогда переходом движения от атомных ядер к их атмосферам, а излучение имеет место при переходе движения в обратном направлении. На основе этих гипотез Ранкин далее рассматривает соотношение

¹ „Edinburgh Trans.“, XX, 147 (доложено 4 февраля 1850 г.); стр. 425 (доложено 15 декабря 1851 г.); стр. 565 (доложено 17 января 1853 г.).

78 ПЕРЕМЕНА В ВОЗЗРЕНИЯХ ДЖОУЛЯ

между теплом и механической работой, скрытую теплоту, законы термодинамических машин и т. д.

Между тем в воззрениях самого Джоуля, которого Ранкин называет наряду с Дэви *основоположником своей теории*¹, тотчас же после этого происходит крутой поворот. В работе *«Некоторые замечания о теплоте и строении упругих жидкостей»*² — 1851 г. Джоуль совершенно оставляет, по крайней мере, в отношении тепловой теории газов, допущение о вращении молекул и воздерживается от какой бы то ни было гипотезы об их эфирных атмосферах; по его словам, он это делает не потому, что теория, построенная на этой гипотезе, не согласуется с явлениями, а только ради большей простоты новой теории. *Согласно последней теплота упругих жидкостей обуславливается прямолинейным поступательным движением их атомов*, которые движутся с большими скоростями во всех направлениях; *а температура газа пропорциональна живой силе этих движений его молекул*. Приписывая эту гипотезу Герапату³, сам Джоуль тотчас же делает дальше в этой чисто механической тепловой теории газов несколько смелых и плодотворных шагов. «Представим себе, — говорит он, — сосуд в форме куба, сторона которого равна одному футу, наполненный водородом; при температуре 60° F и 30 дюйм. барометрического давления этот сосуд будет весить 36,927 гран. Представим себе, далее, это количество газа разделенным на три равные и произвольно малые упругие частицы по 12,309 гран каждая и пусть, далее, каждая из этих частиц колеблется между двумя противоположными сторонами куба... Требуется теперь определить скорость, с какой должна двигаться каждая частица, чтобы уравновесить атмосферное давление в 14831712 гран на каждую сторону куба. Известно, что тело, движущееся со скоростью 32¹/₆ фут. в секунду, останавливается, если ему противопоставить в течение секунды давление, равное его собственному весу; если же подобное давление продолжится еще одну секунду, то тело приобретает скорость 32¹/₆ фут. в обратном направлении. При такой скорости каждая частица в 12,309 гран будет ударяться в каждые две секунды по 32¹/₆ раз в каждую из стенок куба; вызванное этим давление составляет $12,309 \times 32^{1/6} = 395,938$ гран. Как известно, давление пропорционально квадрату скорости частиц; следовательно, для того чтобы вызвать давление в 14 831 712 гран, скорость частиц должна быть равна

¹ „Edinburgh Trans.", XX, стр. 148.

² „Mem. of the Manch. Lit and Phil. Soc.", ноябрь 1851; также „Philosophical Magazine" (3), XIV, стр. 211, 1857; „Das mechan. Wärmeäquivalent", стр. 120).

³ „Annals of philosophy", I, 1821; также „Mathematical Physics", 1847. Даниил Бернулли высказал подобные же воззрения уже в 1738 г. в своей „Hydrodynamica" (Sect. X, стр. 200, Strassburg 1738), хотя и не развил их подробно. „Представим себе... цилиндрический вертикально стоящий сосуд с подвижной крышкой, на которой лежит груз; и пусть сосуд будет наполнен очень маленькими молекулами, движущимися с громадными скоростями во всевозможных направлениях; таким образом, молекулы, ударяясь о крышку и поддерживая ее своими непрерывными толчками, представят собою упругую жидкость, расширяющуюся при удалении или уменьшении груза и сгущающуюся при его увеличении. Подобную жидкость... представим себе вместо воздуха: этим путем мы объясним некоторые уже известные свойства его, а также поясним другие свойства его, которые еще недостаточно исследованы".

$$v = \sqrt{\frac{14\,831\,712}{395,938}} \times 32^{1/6} = 6\,225 \text{ фут. в секунду}.$$

что вывод остается тем же, на сколько бы частиц мы ни разделили все количество газа в кубе; *поэтому найденное число 6225 должно представить собою и скорость атомов водорода при 60° F.* Известно, что давления одной и той же упругой жидкости при 60 и 32° относятся между собою, как 519 к 461, поэтому скорости атомов водорода при 60 и 32° должны относиться друг к другу, как $\sqrt{519}$ к $\sqrt{461}$; отсюда последняя скорость определяется в размере 6055 фут. в секунду. Джоуль особо отмечает, что из новой его тепловой теории легко выводится закон Мариотта как естественное его следствие. Далее, из пропорциональности между абсолютною температурою и живой силой газовых частиц, а, следовательно, и давлением газа, он легко выводит, что *температура абсолютного нуля лежит на 491° F* ниже точки замерзания воды. Наконец, при помощи новой своей теории он определил *удельную теплоемкость водорода*, а затем и *остальных газов*, причем, конечно, оказалось, что полученные им величины слишком малы по сравнению с теми, которые были получены Деларошем и Бераром с помощью измерений.

Таким образом, Джоуль положил даже основание кинетической теории газов. Однако прошли еще долгие годы, прежде чем начали более углубленно заниматься разработкой этой теории. *Пока же на ближайшее время чувствовалась потребность, вследствие доказанной уже неприемлемости воззрений Карно на теплород и его «падение», вывести законы превращения теплоты в механическую работу, исходя из новых воззрений на теплоту.* В теории теплового процесса Карно в скрытом виде содержалось два положения о переходе тепла в работу. Во-первых, закон, согласно которому определенное количество тепла с определенным тепловым падением способно при всех обстоятельствах произвести одинаковую работу, а затем не менее важное положение, что лишь при обратимых круговых процессах произведенная работа способна вернуть действовавшему количеству теплоты его прежнее падение, т. е. поднять температуру определенного количества теплоты на прежнюю высоту. *Первое из этих положений касается постоянства энергии* — начала, установленного Майером, Джоулем и др. *Второе же положение касается эквивалентности превращений энергии;* оно было установлено, главным образом, Клаузиусом, им же точно сформулировано и для отличия от первого названо *вторым началом механической теории теплоты.* Карно доказывал это положение, исходя из своего представления о тепловом токе, но Клаузиус уже в 1850 г. в своей первой работе «О движущей силе теплоты»¹ показал, что это положение может быть сохранено и в новой теории теплоты, если только принять за аксиому, что *теплота сама собою не может переходить от тела с более низкой температурой к телу с более высокой температурой.*

¹ „Pogg. Ann.“, LXXIX, стр. 368 и 500, 1850. Rudolf Julius Emmanuel Clausius (1822—1888), в 1850 г. — преподаватель Королевской артиллерийско-инженерной школы в Берлине; в 1857 г. — профессор физики в Политехнической школе в Цюрихе, потом в Вюрцбурге, а с 1869 г. — в Бонне.

80 ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕОРИИ ТЕПЛОТЫ У КЛАУЗИУСА И ТОМСОНА

Клаузиус исходил из мысли, что новая теория теплоты не может допускать получения работы за счет изменения распределения теплоты (как это принял Карно), а должна *установить непосредственное потребление последней*. По его словам, уже Гольцман в 1845 г. в своей работе «О теплоте и упругости паров» придерживался, по-видимому, такого же взгляда, но затем молча снова вернулся к допущению постоянства количества тепла. Правильнее взглянул на это дело У. Томсон¹, который, разбирая теорию Карно, признал потребление тепла несомненным и в то же время несовместимым с воззрением Карно. Но когда вслед за этим Томсон утверждает, что если отбросить основы теории Карно, то наталкиваешься на бесчисленные трудности, которые представляются непреодолимыми без дальнейших новых экспериментальных исследований и без полной перестройки теории теплоты², то против этого следует возразить, что, с одной стороны, указанных трудностей бояться не следует, а с другой стороны — нет необходимости совершенно отказываться от положений Карно, следует только внести некоторые изменения в его представления³. Следует принять в качестве *первого положения теории теплоты*, «что во всех случаях, когда теплота производит работу, потребляется количество тепла, пропорциональное полученной работе, и что, наоборот, при потреблении такой же самой величины работы получается такое же точно количество тепла». Во втором же положении Карно, «что получению работы соответствует, в качестве эквивалента, просто переход тепла от тела более теплого к телу более холодному, без уменьшения количества теплоты», последнее добавление должно быть, конечно, *совершенно отброшено*; но в остальном это положение, по основному своему смыслу, может быть сохранено. Правда, переход тепла не имеет ничего общего с потреблением его, но все-таки возможно, что *переход всегда должен иметь место одновременно с потреблением и что этот переход находится в некотором определенном отношении к работе*. Остается, значит, исследовать, является ли подобное предположение не только возможным, но и вероятным. Однако в действительности эта вероятность существует, *ибо совершенно противоречило бы обычным свойствам теплоты*, если бы ее можно было без каких-либо иных изменений, в любом количестве, переводить из более холодного тела в более теплое: ведь теплота всегда проявляет стремление к такому выравниванию возникающих температурных различий, что она переходит от более теплого тела к более холодному. «Поэтому мне представляется правильным сохранить существенную часть допущения Карно и применять его наряду с приведенным выше в качестве *второго начала*»⁴.

Тотчас же вслед за Клаузиусом и У. Томсон согласовал положение Карно с новыми воззрениями на теплоту и разработал положение, соответствующее второму началу Клаузиуса⁵. Подойдя к этому вопросу

¹ „An account of Carnot's theory", „Edinburgh Trans.", XVI, стр. 541, 1849.

² Там же, стр. 545.

³ „Pogg. Ann.", LXXIX, стр. 372.

⁴ „Pogg. Ann.", LXXIX, стр. 503.

⁵ „On the Dynamical Theory of Heat", „Edinburgh Trans.", XX, стр. 261 (доложено 17 марта 1851 г.); стр. 281 (доложено 21 апреля 1851 г.); стр. 475

ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕОРИИ ТЕПЛОТЫ У КЛАУЗИУСА И ТОМСОНА 81

еще более обще, чем последний, он затем перешел к рассмотрению всех различных возможных форм энергии не только с точки зрения их величины, но и с точки зрения их способности к превращению¹. Он показал, что не все формы энергии, при одинаковой величине, обладают равной способностью к превращению, что, например, превращение теплоты при некоторых условиях становится совершенно невозможным. В основу своих исследований он, вместо представления Карно о тепловом падении, кладет следующую аксиому: «При посредстве неодушевленного тела невозможно получить механического действия от какой-либо массы вещества путем охлаждения ее температуры ниже температуры самого холодного из окружающих тел»². Так как при всех происходящих в природе превращениях энергии часть последней всегда превращается в теплоту, то следует признать неизбежным постепенное превращение всех форм энергии в теплоту, а, следовательно, и постепенное исчезновение всяких тепловых различий во вселенной. У. Томсон называет это явление «рассеянием энергии» и из него выводит постепенное снижение до нуля всех возможных видов работоспособности в природе и неизбежно связанное с этим наступление конца всего существующего.

Наконец, в том же 1851 г. Ранкин³ привел новое доказательство

(доложено 15 декабря 1851 г.). Пять частей этой работы имеют фундаментальное значение для математической разработки новой теории теплоты.

¹ „On an Universal Tendency in Nature to the Dissipation of Mechanical Energy“, „Philosophical Magazine“ (4), IV, стр. 304, 1852.

² „It is impossible, by means of *inanimate material agency*, to derive mechanical effect from any portion of matter by cooling it below the temperature of the coldest of the surrounding objects“ („Edinburgh Trans.“, XX, стр. 265).

Максвелл поясняет выражение „by means of *inanimate material agency*“ и этим определяет пределы второго начала теории теплоты следующим образом: „Это положение, несомненно, верно, пока мы имеем дело с телами большой массы и не имеем возможности ни различать отдельных молекул в этих массах, ни работать с ними. Но если представить себе существо со столь изощренными способностями, что оно было бы в состоянии следить за каждой отдельной молекулой во всех ее движениях, то подобное существо, если бы его способности при этом были бы все-таки такими же конечными, как наши, — было бы способно сделать то, что для нас в настоящее время невозможно. В самом деле, мы видели, что молекулы, находящиеся в сосуде с воздухом при равной повсюду температуре, отнюдь не движутся с равными скоростями, хотя средняя скорость для всякой большой, произвольно выбранной группы молекул повсюду одинакова. Представим себе теперь, что какой-нибудь сосуд разделен на две части *A* и *B* перегородкой с маленьким отверстием в ней. Пусть существо, способное различать отдельные молекулы, попеременно то открывает, то закрывает отверстие, и притом таким образом, чтобы только быстрее движущиеся молекулы могли переходить из *A* в *B*, и только медленнее движущиеся, наоборот, из *B* в *A*. Следовательно, такое существо без затраты работы повысит температуру в *B* и понизит ее в *A* — вопреки второму началу термодинамики“ (Maxwell, *Theorie der Wärme*, перевод на немецкий язык F. Neesen, Braunschweig 1878, стр. 374). — Впрочем, мне представляется, что в данном случае приведение энергии в годный вид удалось бы и одушевленному существу не без затраты некоторой работы и, кроме того, что по отношению к нашему человеческому естествознанию такого рода дедуция неприменима.

³ „Edinburgh Trans.“, XX, стр. 205 (доложено в апреле 1851 г.); на стр. 425 приведено еще другое, принципиально тождественное доказательство, „но вывод изложен в более понятной форме“ (стр. 439).

82 ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ ВТОРОГО НАЧАЛА ТЕОРИИ ТЕПЛОТЫ

в пользу второго начала теории теплоты, применительно к термодинамическим машинам; впрочем, по поводу этого доказательства Клаузиус ¹ указал, что оно в некоторых и как раз очень важных случаях находится в противоречии с воззрениями, высказанными самим Ранкиным в других местах ².

Через три года, в 1854 г.⁸, Клаузиус облек второе начало в более определенную *математическую форму*; но лишь долгое время спустя он вывел из него *дальнейшие и конечные заключения* и таким путем пришел к представлениям, аналогичным тем, которые Томсон определил выражение рассеяние энергии ⁴. Уже из представления Карно следует, что на работу затрачивается не все падение теплоты до абсолютного нуля, а лишь падение ее до температуры наиболее холодного действующего тела. Но и по аксиоме Клаузиуса, устанавливающей невозможность перехода тепла от более холодного тела к более теплomu без каких-либо компенсаций, получилось то же самое для способности превращения теплоты в работу. Величина способной к превращению

¹ „Die mechanische Wärmetheorie“, I, стр. 357, Braunschweig 1876.

² У. Томсон в конце своего доказательства второго начала говорит: „Я заявляю это не потому, что желал бы отстоять свой приоритет, так как заслуга первого установления этого положения на правильных основаниях принадлежит целиком Клаузиусу... Я позволяю себе прибавить, что я дал доказательство в том виде, как оно мне представилось, раньше чем узнал, что Клаузиус провозгласил или доказал это положение“ („Edinburgh Trans.“, XX, стр. 266). Аналогично высказывается по поводу Клаузиуса и Ранкин: „Карно первый отстаивал закон, что отношение максимума механического эффекта ко всей теплоте, затраченной в расширительной машине, является функцией только двух температур, при которых теплота соответственно получается и отдается, и не зависит от природы действующего вещества... Заслуга сочетания закона Карно, как его обычно называют, с законом превратимости теплоты и силы принадлежит м-ру Клаузиусу и проф. Вильяму Томсону; в том точном смысле, какой они ему придали, он может быть изложен следующим образом: максимальная доля теплоты, превращенной в механическую силу какой-либо машиной, является только функцией температур, при которых теплота была получена и отдана рабочим веществом; эта функция для каждой пары температур является неизменной для всех веществ в мире. Этот закон был установлен м-ром Клаузиусом, подобно тому, как по началу его дал и Карно, — в качестве самостоятельной аксиомы. У меня на первых порах были сомнения в правильности тех доводов, в силу которых он сохранил эту аксиому. Я сообщил о своих сомнениях проф. Томсону, и последнему я обязан тем, что он побудил меня внимательно до конца продумать этот вопрос; ибо, хотя я еще не видел его работы и не познакомился с его методом доказательства закона Карно, я получил от него сообщение о некоторых наиболее важных его выводах“ („Edinburgh Trans.“, XX, стр. 205—206).— William Thomson родился в 1824 г. в Белфасте, где его отец был преподавателем математики. Образование получил в Кембридже, в 1847 г. уже был профессором физики в Глазго. Его математические и физические исследования были изданы в виде особого сборника под заглавием „Mathematical and physical papers, collected from different scientific periodicals from may 1841, to the present time“, 2 тома, London 1882 и 1884. Помимо теории теплоты, он с большим успехом работал и в области электричества. За свои научные заслуги он получил звание лорда Кельвина. Умер он в 1908 г. — William John Macquorne Rankine (1820—1872) — гражданский инженер, позднее профессор инженерных наук и механики в Глазго.

³ „Über eine veränderte Form des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie“, „Pogg. Ann.“, XCIII, стр. 481.

⁴ „Pogg. Ann.“, CXVI, 1859; CXXI, 1864; CXXV, 1865.

ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ ВТОРОГО НАЧАЛА ТЕОРИИ ТЕПЛОТЫ 83

энергии не равна абсолютной величине последней; она не только прямо пропорциональна теплоте (если мы всю энергию выразим в теплоте), но и обратно пропорциональна абсолютной температуре более холодного тела. Эту энергию, способную к превращению, или объем превратимости (*Verwandlungsinhalt*) тела, можно, следовательно, выразить отношением Q/T , где Q обозначает теплоту, а T — абсолютную температуру. Далее Клаузиус доказал, что для обратимого кругового процесса должна иметь место формула $\int dQ/T=0$ ¹, а для необратимого — $\int dQ/T<0$ ², если переход тепла от более высокой температуры к более низкой считать положительным. Поэтому лишь при обратимом круговом процессе ничего не теряется из той части энергии, которая способна к превращению; при необратимых же круговых процессах

¹ „Pogg. Ann“, XCIII, стр. 487, 1854. Клаузиус говорит здесь (стр. 488) о первой более ранней форме своего второго начала: „Однако при выводе этого положения за основу был принят слишком простой процесс, при котором имеется лишь два тела, теряющих или приобретающих теплоту; тем самым молча допускалось, что теплота, превращаемая в работу, получается от одного из тех самых двух тел, между которыми происходит тепловой обмен. Но так как этим путем делается определенное допущение о температуре тепла, превращенного в работу, то тем самым затемняется влияние, оказываемое изменением этой температуры на отношение между обоими количествами тепла, а потому, следовательно, и положение в приведенной выше форме является неполным“.

² „Pogg. Ann.“, CXVI, стр. 73, 1862. В этой работе Клаузиус начинает обоснование своего расширенного закона следующими словами: „Внутренняя работа вообще так мало известна и связана с другою опять-таки неизвестною величиною таким образом, что при рассмотрении ее приходится до известной степени руководиться соображениями вероятности... Так как в предшествующей своей работе я хотел избежать всего гипотетичного, то я совершенно исключил из нее внутреннюю работу, что было возможно, так как я ограничился лишь круговыми процессами... В самом деле, при всяком таком процессе величины внутренних работ... взаимно уничтожаются“ (стр. 73—74)... „С опубликованием остальной части своего закона я до сих пор медлил, так как он приводит к выводу, значительно отклоняющемуся от распространенных до сих пор воззрений на теплоту, заключающуюся в телах; поэтому мне казалось желательным подвергнуть его дальнейшей проверке. Но так как с течением лет я все более и более убеждался в том, что этим воззрениям, имеющим свои корни скорее в привычке, чем в научных обоснованиях, не следует придавать большого значения, то я позволяю себе, покончив, наконец, со своими сомнениями, представить на суд ученой публики положение об эквивалентности превращений в полном его объеме, а также связанные с ним положения“ (стр. 74). „Процессы эти (посредством которых теплота может производить работу) всегда можно свести к изменению расположения составных частей в теле под влиянием теплоты... Для того чтобы иметь возможность выразить это математически, введем для представления степени разложения тела новую величину, которую обозначим термином *дисгрегации* тела; при помощи последней мы сможем просто определить действие тепла таким образом, что оно стремится усилить дисгрегацию“ (стр. 78—79). Найдя затем математическое выражение для дисгрегации, Клаузиус с помощью его дает доказательство своего положения в самом общем виде. В конце своей работы он доказывает, что для охлаждения тела до абсолютного нуля потребовалось бы бесконечно большое изменение дисгрегации и что, следовательно, такое охлаждение невозможно.

84 ЭНТРОПИЯ

последняя при всех обстоятельствах уменьшается. Обозначив затем неспособную дальше к превращению часть энергии тела новым словом *энтропия*, Клаузиус сформулировал второе начало теории теплоты в следующем чреватом далекими выводами выражении: «*Энтропия вселенной стремится к максимуму*»¹.

Положение Карно-Клаузиуса претерпело много превратностей, да и сейчас собственно его судьбу еще нельзя считать вполне установленной или, во всяком случае, вполне обеспеченной. Правда, по отношению

к круговым процессам в форме $\int dQ/T=0$ оно почти не встретило возражений,— старались лишь упростить способ его вывода в соответствии со своими собственными воззрениями. Ранкин, который, как было уже упомянуто, вывел этот закон своим особым способом, сначала дал

функции dQ/T особое название *термодинамической функции*, а Цейнер

в своем известном сочинении «*Grundzüge der mechanischen Wärmetheorie* («Основы механической теории теплоты») сравнил энергию, способную быть превращенной без компенсации, с потенциальной энергией подвешенного груза и поэтому при своем выводе второго начала назвал упомянутую функцию *тепловым весом*. Эттинген², пытавшийся вывести второе начало теории теплоты из первого, предложил для той же функции иное название — *адиабаты*, терминологию же Клаузиуса он признал наименее удачной из всех. Он особенно возражал и прошег того, что *Клаузиус применил второе начало к необратимым круговым процессам*, а также против сделанных им отсюда дальнейших выводов. «*Только что приведенные положения Томсона и Клаузиуса*, — говорит он в 1875 г., — *я считаю спорными и могу, мне кажется, доказать, что из числа положительных с виду элементов определенной Клаузиусом энтропии многие оказываются равными нулю*. Хотя в этом и не содержится еще никакого опровержения указанных тезисов, тем не менее

¹ Относительно происхождения слова *энтропия* Клаузиус в той работе, где он его вводит („*Pogg. Ann.*“, СХХV, стр.390, 1865). говорит следующее: „Слово энтропия я намеренно подобрал возможно ближе к слову энергия, так как обе соответствующие этим выражениям величины настолько близки по своему физическому смыслу, что они, по моему мнению, требуют однородного обозначения“.

В конце этой работы (стр. 398) он сам характеризует свое второе начало следующим образом: „*Второе начало в том виде, какой я ему придал, гласит, что все совершающиеся в природе превращения в определенном направлении, которое я принял в качестве положительного, могут происходить сами собою, т. е. без компенсации, но в обратном, т. е. отрицательном, направлении, они могут происходить только при условии, если они компенсируются происходящими одновременно с ними положительными превращениями*. Применение этого начала ко всей вселенной приводит к заключению, на которое впервые указал У. Томсон. В самом деле, если при всех происходящих во вселенной изменениях состояния превращения в одном определенном направлении постоянно преобладают по своей величине над превращениями в противоположном направлении, то общее состояние вселенной должно все больше и больше изменяться в первом направлении и таким образом оно должно непрерывно приближаться к предельному состоянию“.

² „*Pogg. Ann.*“, дополнительный том VII, стр. 83, 1875, А. J. v. Oettingen (родился в 1836 г.) — профессор физики в Дерпте.

ОБЩЕПРИМЕНИМО ЛИ ВТОРОЕ НАЧАЛО? 85

они не являются бесспорными, даже совершенно независимо от того, допустить ли в организмах, как это, по-видимому, полагает Томсон, возможность отклонения от физических законов или нет»¹. И действительно, многим физикам представлялось, что *второе начало* находится в таком *противоречии с первым*, что оно, по крайней мере, частично, уничтожает только что признанное начало сохранения энергии. Если далеко идущие выводы из второго начала устраняли вполне обоснованным указанием на то обстоятельство, что величина наличной полезной энергии и размер ее потребления нам совершенно неизвестны, в силу чего с точки зрения этих воззрений конец мира выходит далеко за пределы наших представлений, то *многие физики считали работоспособность или превратимость абсолютно связанной с понятием энергия, а неспособная более к превращению энергия, с их точки зрения, вообще переставала быть энергией*. Для того чтобы все-таки сохранить во всей строгости положение о постоянстве энергии, им приходилось возражать не против обоснования второго начала, которое представлялось трудно уязвимым, а против *самой основы его, т. е. аксиомы Клаузиуса*, и указывать на сомнительность последней. И, действительно, многие нападки были направлены именно в эту сторону. Так, в 1852 г.² Ранкин выступил против аксиомы о невозможности перехода без компенсации тепла с более холодного тела на более теплое, — с возражением, имевшим видимость серьезного довода, что при помощи вогнутого зеркала можно концентрировать теплоту и, таким образом, без всякой затраты энергии можно переводить ее с более низкой температуры на более высокую. Клаузиус возразил на это, что никакое вогнутое зеркало не может дать в своем фокусе температуру выше той, какая присуща телу, испускающему лучи³, — по крайней мере, при условии, что тепловое излучение зависит не только от строения тела и его температуры, но также и от среды, через которую происходит излучение, так что это последнее обратно пропорционально скорости распространения лучей в среде или прямо пропорционально квадрату показателя их преломления в этой среде. Теодор Ванд⁴, помимо некоторых возражений преимущественно механического порядка, указал на то обстоятельство, что свет и тепло, разлагая в растениях угольную кислоту, отлагают в них углерод, дающий при горении несравненно более высокую температуру, чем температура самих химических действующих лучей солнца. Но на это, согласно Р. Рюльману⁵, можно возразить, что солнечные лучи возникают не в атмосфере, температуру которой, по-видимому, Ванд склонен приписывать излучающему телу, а на солнце, температура которого, во всяком случае, должна

¹ „Pogg. Ann.“, дополнительный том VII, стр. 85.

² „Philosophical Magazine“ (4), IV, стр. 358: „On the reconcentration of the mechanical energy of the universe“.

³ „Über die Concentration von Licht- und Wärmestrahlen und die Grenzen ihrer Wirkung“, „Pogg. Ann.“, CXXI, стр. 1, 1864; также „Mechanische Wärmetheorie“, стр. 314, Braunschweig 1876.

⁴ „Kritische Darstellung des zweiten Satzes der mechanischen Wärmetheorie“ von Th. Wand, Carl's Repertorium für Experimentalphysik, IV, стр. 231 и 369, 1868.

⁵ „Handbuch der mech. Wärmetheorie“, I, стр. 389, Braunschweig 1875.

86 ВОЗРАЖЕНИЯ ПРОТИВ ВТОРОГО НАЧАЛА

быть выше всяких температур, которые могут быть получены путем горения тел на земле.

Известный теоретик по вопросам теплоты, Гирн¹, описал в 1862 г. в своем сочинении «Exposition analytique et experimentale de la chaleur» («Аналитическое и экспериментальное объяснение теплоты») очень любопытную *термодинамическую машину*, с помощью которой можно было нагревать газ от 0 до 120° и выше, без посредства какого-либо тела, которое имело бы температуру выше 100°, и без затраты силы. В ответ на это Клаузиус отметил, что в данном случае газ, подлежащий нагреванию, играет *двойную роль* и что тепловой поток, переходящий с теплого тела на холодный газ, представляет собою ту *компенсацию*, которая необходима, согласно его аксиоме, для поднятия температуры этого самого газа выше температуры теплого тела. После этого Гирн признал, что возражение, основанное на действии его машины, является лишь *кажущимся*, и объявил о своем *согласии с воззрениями Клаузиуса*². Совершенно таким же образом Клаузиус устранил возражение Тэта, который в опровержение аксиомы Клаузиуса указал, что с помощью *термоэлектрического столба*, места спаев которого поддерживаются при температурах 0 и 100°, можно тонкую проволоку легко довести до накаливания, т. е. до температуры, превышающей 100°³. Позднее Тэт решился выступить еще с одним возражением. Выше было уже указано, что Максвелл⁴ при своей математической разработке теории газов допустил, что при совершенно равной температуре газа молекулы его все-таки обладают *различной живой силой* и что *температура газа соответствует только среднему значению всех этих сил*; при этом он также отметил, что, таким образом, здесь, по крайней мере, для *существования сверхчеловеческого порядка*, которые были бы в состоянии сортировать эти молекулы, второе начало оказалось бы недействительным. Тэт⁵ попытался перенести это представление в мир *обычного человеческого масштаба*, утверждая, что и без содействия демонов подобная сортировка молекул может происходить сама собою в результате движения самих частиц. Клаузиус⁶ согласился с этим, но отметил, что *момент подобной сортировки*, будучи одного порядка с величиною молекул, будет лишь преходящим и, во всяком случае, для нас незаметным. Всего *труднее* было ответить на *возражение Тольвера Престона*⁷, так как последнее в большей мере, чем все прежние, затронуло темную область молекулярных сил. Пусть герметически со всех сторон закрытый цилиндр внутри будет разделен на две равные

¹ G. Ad. Hirn (родился в 1815 г.). —владелец ткацкой фабрики.

² R. Clausius, Die mechanische Wärmetheorie, I, стр. 373—378.

³ „Philosophical Magazine" (4), XLIII, стр. 328; XLIV, стр. 240; „Pogg. Ann.", CXLV, стр. 496, 1872; „Pogg. Ann.", CXLVI, стр. 308.

⁴ „Theory of Heat", London 1871; немецкий перевод Neesen'a, II, стр. 374, Braunschweig 1878.

⁵ „Lectures on some recent advances in Physical Science", второе издание. London 1876; перевод на немецкий язык Wertheim'a, стр. 101, Braunschweig 1877.

⁶ „Die mechanische Behandlung der Elektrizität", стр. 317, Braunschweig 1879.

⁷ „Nature", XVII, стр. 202, 1878. Сомнение в применимости второго начала к явлениям диффузии в новейшее время высказал Р. Пикте' („Tageblatt der 60. Versammlung deutscher Naturforscher", стр. 231, Wiesbaden 1888).

МЕХАНИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ ВТОРОГО НАЧАЛА 87

части подвижным поршнем из обожженной глины или графита и т. п.; одна половина цилиндра пусть будет заполнена водородом, а другая кислородом. Так как водород диффундирует через поршень сильнее кислорода, то поршень будет двигаться в сторону водорода; следовательно, в данном случае не только будет производиться полезная работа без какой-либо внешней компенсации, но, кроме того, будут происходить охлаждение водородной части цилиндра и нагревание кислородной части его. Клаузиус¹ возразил на это и, как нам, кажется, вполне обоснованно, что и в сосуществовании рядом различных газов налицо имеется запас полезной энергии, что смешанным газам следует приписать большую дисгрегацию, чем несмешанным, и что в этом увеличении дисгрегации при смешении и заключается компенсация произведенных механических работ и температурных разностей. Если, таким образом, Клаузиусу удалось отстоять свое второе начало, то уже самый факт появления приведенных возражений позволял все-таки несколько усомниться в аксиоматической природе указанного начала. К этому присоединилось еще одно соображение. Если теплота, как это принимает новая теория, есть лишь *род движения* и представляет собою, следовательно, *чисто механическое явление*, то все ее свойства должны быть выведены из известных механических аксиом. Так как температура тела только пропорциональна движению его молекул, то вопрос о возможности перехода теплоты с одного тела на другое должен разрешаться только в соответствии с особенностями этого движения и без всякой специальной тепловой аксиомы. Легко также видеть, что и по отношению к энергии *чистого движения*, — если представить себе всю потенциальную энергию не существующей, — второе начало, или учение о полезной энергии, должно быть совершенно так же применимо, как и в теории теплоты. Правда, абсолютная величина энергии движущегося тела пропорциональна квадрату его абсолютной скорости; но *фактически действующая энергия зависит не от абсолютного, а от относительного движения, от существующих разностей движения*. Когда в изолированной материальной системе движения отдельных частей настолько выровнялись, что все скорости стали равными по величине и по направлению, то, несмотря на любую величину абсолютной энергии, полезная энергия системы все-таки равна нулю. Поэтому перед механической теорией теплоты, которая, конечно, должна быть чисто кинетическим учением, возникла совершенно неизбежная проблема вывести второе начало теории, без посредства особой тепловой аксиомы, из чисто механических принципов. Раньше всех начал работать в этом направлении Л. Больцман, написавший в 1866 г. исследование: «Über die mechanische Bedeutung des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie» («О механическом значении второго начала механической теории теплоты»)²; за ним,

¹ „Die mechanische Behandlung der Elektrizität“, стр. 318.

² „Sitzungsber. d. Wien. Akad.“, LIII, 2 Abth., стр. 195. Ludwig Boltzmann {1844—1906, профессор физики в Граце, Мюнхене, Лейпциге, Вене) говорит в конце своего доказательства второго начала: „Легко видеть, что наши заключения несколько не зависят от значения, придаваемого этим величинам в учении о теплоте; они, таким образом, одновременно доказывают теорему чистой меха-

88 ПРИНЦИП НАИМЕНЬШЕГО ДЕЙСТВИЯ

спустя пять лет, последовал сам Клаузиус¹, пришедший к тем же выводам, что и Больцман, но только в несколько более общем виде. Оба эти вывода были аналогичны операциям, при помощи которых в механике определяют *принцип наименьшего действия*. Затем, в 1872 г., К. Чили (C. Szily) выступил с указанием, что второе начало механической теории теплоты представляет собою не что иное, как непосредственное применение *принципа Гамильтона* к теории теплоты, и действительно прямо из него вывел второе начало².

Если в названных работах и встречались некоторые недочеты с точки зрения ясности и строгости выводов, а также с точки зрения сделанных при этом допущений, то они, во всяком случае, показали *возможность обосновать второе положение на чисто механических началах без помощи каких бы то ни было специальных предпосылок теории теплоты*. Но вследствие этого второе начало вышло уже из более узких границ учения о теплоте и стало *принципом превращения всякой энергии вообще, т. е. общим принципом всей физики*. Таким образом, развитие второго начала шло совершенно параллельно развитию первого начала о постоянстве энергии и самое это положение сделалось необходимым дополнением к началу сохранения энергии во всей физике. В таком направлении и развивались потом исследования многих физиков, начиная с половины семидесятых годов. И Гельмгольц, не касавшийся больше этих тем со времени своей известной работы 1847 г., вернулся к ним в восьмидесятых годах. В 1882 г. он попытался применить второе начало к *химическим процессам*³; вслед за тем

ники, соответствующую второму началу, — совершенно так же, как начала живых сил соответствует первому; это есть, как легко видеть из нашего рассмотрения, начало наименьшего действия (стр. 217).

¹ „Pogg. Ann.“, CXLII, стр. 433, 1871.

² „Pogg. Ann.“, CXLV, стр. 295, 1872; CXLIX, стр. 74, 1873. Клаузиус не вполне согласился с этим прямым отождествлением обоих начал. Он говорил („Pogg. Ann.“, CL, стр. 106, 1873): „Чили, заявивший уже в более ранней своей статье о тождестве того положения, которое мы в термодинамике называем вторым началом, с началом Гамильтона, повторил то же самое и в новой своей статье, Но я надеюсь, из настоящей моей статьи он убедится, что между уравнением Гамильтона и тем уравнением, которое применяется в термодинамике для пояснения второго начала, имеется существенное различие“. Позднее Чили попытался вывести второе начало из первого уже без всяких дополнительных гипотез („Pogg. Ann.“, дополнит. том VII, стр. 151, 1875). Koloman v. Szily (родился в 1838 г.) — профессор Политехнической школы в Будапеште.

³ „Die Thermodynamik chemischer Vorgänge“, „Sitzungsber. d. Berl. Akad.“, стр. 22, 1882; также „Wissenschaftl. Abhandlungen“, II, стр. 958. В этой работе Гельмгольц вводит термины *свободной* и *связанной* энергии. „*Запас теплоты, как известно на основании закона Карно, точнее сформулированного Клаузиусом, не может быть неограниченно превращен в другие эквиваленты работы; мы можем достичь этого, да и то только частично, заставляя переходить непревращенный остаток теплоты в тело с более низкой температурой...* Если принять во внимание, что химические силы способны производить не только теплоту, но и другие формы энергии, — последнее даже без всякого соответствующего изменения температуры взаимодействующих тел, каков, например, случай работы гальванических батарей, — то для меня представляется совершенно бесспорным, что и для химических процессов следует принять *разделение сил сродства на две части, из которых одна способна свободно превращаться в иные формы работы, а другая превращается лишь в теплоту*. Поэтому я

ПОНЯТИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ 89

обратился к *чисто механическому* рассмотрению всех процессов, подходящих под второе начало ¹ и в результате этих исследований тоже пришел к упомянутой выше высокой оценке *принципа наименьшего действия Мопертюи-Гамильтона* ².

По меньшей мере, столько же трудностей, как при попытках заменить тепловую аксиому Клаузиуса для второго начала соответствующей аксиомой механики, встретили ученые и при *механическом обосновании понятия температуры*. Неясность этого понятия была уже давно признана. Уже *приверженцы теплорода* заметили, что наши термометрические градусы, отсчитываемые от произвольно избранного нуля, не применимы для абсолютных измерений количеств тепла; поэтому уже они пытались установить *абсолютную нулевую точку термометра*. Клауфорд в своей известной работе «On animal heat» («О животной теплоте») установил ее в — 821° С. Дальтон пытался определить абсолютную точку нуля из теплоты смешения различных веществ при помощи теплоемкости последних, но при этом он пришел к очень разноречивым результатам ³. Лучшие результаты дало использование коэффициента расширения газов от теплоты. Так как при нагревании газа от 0 до 266°,66 С объем его увеличивается вдвое ⁴, то можно принять, что для образования единицы объема необходимо нагревание на 266°,66 и что при охлаждении от 0 до 266°,66 газ совершенно потеряет свой объем, т. е. будет сведен к нулевому объему. Но так как в объеме 0 не может уже быть и теплорода, то, значит, темпера-

позволю себе в последующем для краткости называть обе эти части энергии *свободной и связанной энергией*" (стр. 958—959).

¹ Journal für reine u. angew. Mathematik", XCVII, стр. 111 и 317, 1884 г., „Sitzungsber. d. Berl. Akad", стр. 159, 311, 755 и 1197, 1884.

² См. 1-й выпуск 3-й части настоящей работы, стр. 228. Л. Пфаундлер связал со вторым началом соображения самого *общего* характера без математических обоснований („Pogg. Ann.", юбил. том, стр. 182, 1874), поставив себе целью показать, *что благодаря известному стремлению к поддержанию крайних форм рост энтропии во вселенной замедляется*. В конце статьи он говорит: „Из второго начала механической теории теплоты сделали тот вывод, что ход мировых часов когда-нибудь остановится. Когда часовая гиря достигла пола, то вся работа превратилась в теплоту, которую уже нельзя употребить на то, чтобы вновь поднять гирю. Энтропия (часового механизма) достигла максимума". Однако при захватывании зубцов якорным крючком каждый раз, когда маятник опускается, гиря поднимается несколько вверх, и это отрицательное превращение компенсирует часть положительного превращения, работа крючка компенсирует часть расхода работы, производимого падающим грузом. Таким образом, увеличение энтропии замедляется рядом противоположных изменений. Указанному подъему и опусканию маятника в природе соответствует жизненный процесс в растениях и животных (стр. 198). Г. Гельм (профессор Политехнической школы в Дрездене), наоборот, использует известное *стремление энергии* для того, чтобы освободить второе начало, а вместе с тем и понятие *энтропии* от специальной тепловой аксиомы. Вместо последней он вводит следующее положение: „*Всякая форма энергии имеет стремление переходить из мест, где она обладает более высокой интенсивностью, в места, где интенсивность ее ниже*". Как общее правило, всякий переход энергии сопровождается ее преобразованием, и только теплота может переходить от большей интенсивности к меньшей без всякого изменения своей формы („Die Lehre von der Energie", стр. 62, Leipzig 1887).

³ „Manch. Mem.", V, стр. 595, 1802; „Gilbert's Annalen", XII, стр. 316, 1802.

⁴ Коэффициент расширения газов по Гэ-Люссаку равен 0,00375.

90 АБСОЛЮТНАЯ ТЕМПЕРАТУРА И ЕЕ КОСВЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ

тура — $266^{\circ},66$ и должна представлять собою абсолютную точку нуля температуры. К этим выводам Дезорма и Клемана ¹ присоединился Лаплас ², а за ним и большинство физиков того времени ³. Новая теория теплоты могла прямо принять эти выводы, — и при этом она располагала тем важным преимуществом, что вместо прежней идеи о приведении к нулю объема газа она могла принять за основание сведение к нулю скорости. Но зато, с другой стороны, неясности, присущие *вообще понятию температуры*, выступили в механической теории теплоты *гораздо* яснее, чем прежде. Старая теория мало интересовалась вопросом о сущности температуры и судила о ней лишь по ее проявлениям; механическая же теория должна была дать и температуре механическое определение и вывести ее сущность из свойств движения ⁴.

Из основного положения, что температура двух тел одинакова, когда тепло не переходит из одного в другое, можно было сделать тот вывод, что *температура пропорциональна живой силе молекул тела*. Но так как с температурой связаны лишь *внешние действия*, то приведенное определение следует ограничить тою частью живой силы, которая может быть превращена во *внешнюю работу* и не затрачивается на *внутреннюю*; следовательно, это определение непосредственно применимо лишь к таким веществам, у которых внутреннюю работу можно считать равной нулю, т. е. только *к идеальным газам*. У всех же прочих тел температуру можно считать пропорциональной лишь той живой силе, которая свойственна *свободному* тепловому движению их молекул. Но так как, с одной стороны, идеальных газов не существует, а с другой стороны, — у всех прочих тел отношение между внутренней и внешней работой недостаточно ясно, то указанное *прямое определение* температуры было сопряжено как с трудностями для термометрии, так и неудобно для аналитического развития теории теплоты. На этом основании уже давно стали довольствоваться *косвенными определениями* температуры, которые зато находились в тесной связи с существующими математическими выводами. Первым, вступившим на этот путь, был У. Томсон ⁵.

Клапейрон ⁶ из соображений Карно для обратимых круговых процессов вывел следующую формулу:

$$\frac{dQ}{dv} \cdot \frac{dT}{dp} - \frac{dQ}{dp} \cdot \frac{dT}{dv} = C,$$

¹ „Journal de physique“, LXXXIX, стр. 324, 1819.

² „Mécanique céleste“, V, стр. 92.

³ Ср. *Gehler*, *Physikalisches Wörterbuch*, 2 изд., X, стр. 115—126.

⁴ См. Boltzmann, „Sitzungsber. d. Wiener Akad.“, LIII, 2 изд., стр. 195, 1866. Больцман начинает свой трактат о механическом значении второго начала с указания: „Прежде всего, нам здесь необходимо установление основного понятия всего учения о теплоте, до сих пор еще не определенного точным и однозначным образом, именно понятия температуры“.

⁵ „On an absolute thermometric scale founded on Carnot's theory of the motive power of heat and calculated from Regnault's observation on steam“. *Proceedings of Cambridge Phil. Soc.*, June 5, 1848.

⁶ „Pogg. Ann.“, LIX.

АБСОЛЮТНАЯ ТЕМПЕРАТУРА И ЕЕ КОСВЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ 91

где C представляет собой одинаковую для всех тел природы функцию температуры, обратная величина которой равна работе, которую может совершить единица тепла при своем переходе к температуре на один градус ниже¹. Форму этой температурной функции, оставшейся у Клапейрона неопределенной, впервые дал Гельмгольц в своей работе 1847 г.². Соответствующую формулу, которая отсюда получается

для газов: $C = v \frac{dQ}{dv} - p \frac{dQ}{dp}$, Гельмгольц сравнил с другой формулой, данной Гольцманом («Über die Wärme und Elasticität», Mannheim 1845 г.):

$$\frac{pv}{a} = v \frac{dQ}{dp} - p \frac{dQ}{dv},$$

и таким образом нашел, что

$$C = \frac{pv}{a} \quad \text{или} \quad C = \frac{k(1 + \alpha t)}{a},$$

где k обозначает некоторую постоянную величину, a — механический эквивалент единицы теплоты и α — коэффициент расширения газов³. Если в последней формуле $1 + \alpha t$ выразить с помощью абсолютной температуры, вычисленной на основе старого определения с помощью коэффициента расширения газа, то получается $C = \frac{K}{a}$ (так в оригинале, *прим. копировщика*) или же $C = KT/a$, т. е. что температурная функция C пропорциональна абсолютной температуре.

На этом теперь Томсон, наоборот, *основал свое определение температуры*. Джоуль⁴ в своем письме от 9 декабря 1848 г. отметил, что абсолютную температуру можно положить равной просто произведению температурной функции C на механический эквивалент единицы тепла и что, следовательно, указанную выше постоянную K можно принять равной единице. Томсон же обратил внимание на то обстоятельство, что температурная функция C , будучи одинаковой для всех тел природы, особенно пригодна для того, чтобы служить мерилем температуры, и, назвав величину, обратную функции C , функцией Карно, он

¹ Клапейрон в своей работе, где он ввел эту функцию („Pogg. Ann.", LIX стр. 463), говорит: „Легко видеть, что функция C имеет большое значение; она не зависит от природы газа и является только функцией температуры; она существенно положительна и служит мерой величины действия, которое может произвести теплота".

² Отдельные значения этой функции для определенных температур вычислил уже Клапейрон на основании экспериментальных данных Дюлонга („Pogg. Ann.", LIX, стр. 577).

³ „Über die Erhaltung der Kraft", стр. 34—37, Berlin 1847.

⁴ Томсон говорит („Edinburgh Trans.", XX, стр. 279): „М-р Джоуль сообщил мне в письме от 9 декабря 1848 г., что истинное значение $\mu (= 1/C)$ должно быть „обратно температурам, исчисляемым от нуля", а также привел значения ее для разных температур, исчисленные с помощью формулы $\mu = JE/(1 + Et)$, для сравнения их с соответствующими значениями, полученными мною с помощью данных для водяного пара".

92 ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ, ДАННЫЕ ТОМСОНОМ И КЛАУЗИУСОМ

предложил *определить абсолютную температуру как частное от деления механического эквивалента единицы теплоты на функцию Карно*. Согласно этому определению абсолютную температуру можно также рассматривать как температуру, для которой, при бесконечно малом круговом процессе, отношение бесконечно малого повышения температуры к абсолютной температуре можно принять просто равным отношению количества тепла, превращенного в работу, ко всему количеству тепла, перешедшему с теплого тела на холодное ¹. Весьма многочисленные и очень тщательные исследования тепловых действий в газообразных телах ² показали, что вычисленные на основе указанных определений величины абсолютной температуры настолько близко совпадают с показаниями воздушного термометра, насколько этого только можно ожидать, принимая во внимание отступление воздуха от природы идеального газа ³.

Томсоновский косвенный метод определения температуры был в большей или меньшей степени признан всеми специалистами в области аналитической теории теплоты. Клаузиус сперва выводит наиболее общее выражение второго начала теории теплоты в

$$\int \frac{dQ}{\tau} = 0,$$

форме где τ представляет собою неизвестную еще функцию температуры. Затем он показывает, что эта температурная функция τ равна произведению абсолютной температуры T на некоторую постоянную величину. Наконец, он принимает τ просто равной T , так как при относительности понятия температуры постоянный множитель, как показывают формулы, может быть взят совершенно произвольным ⁴. Таким же образом поступает в своих «Grundzüge der mechanischen Wärmetheorie («Основы механической теории теплоты») Цейнер ⁵, который вводит в качестве интегрирующего делителя для dQ функцию S , отличающуюся от функции C Карно только постоянным множителем, и гипотетически приравнивает ее к абсолютной температуре с тем, чтобы с помощью дальнейших выводов проверить правильность этой гипо-

¹ „Heat“, by Sir William Thomson, стр. 44, Edinburgh 1880.

² „Phil. Trans.“, стр. 357, 1853; стр. 321, 1854; „Pogg. Ann.“, XCVII, стр. 576.

³ „Phil. Trans.“, стр. 353, 1854. Таблица абсолютных температур, сопоставленных с показаниями воздушного термометра от 0 до 300° C, дает следующее: „Наибольшее расхождение между 0 и 100° C составляет менее $\frac{1}{20}$ части градуса, а расхождение при 300° C составляет только четыре десятых градуса“.

⁴ „Die mechanische Wärmetheorie“, I, стр. 112.

⁵ 2 изд., Leipzig 1866. Цейнер говорит (стр. 75): „Если я в тексте наперед делаю определенное предположение относительно формы функции S , а именно ввожу гипотезу, что она должна выражать собою самую температуру, то это делается преимущественно с той целью, чтобы уже здесь, при этих общих рассуждениях, иметь определенное мерило температуры, а также из тех соображений, что этим существенно облегчается понимание последующего“. В 3-м издании своего сочинения „Technische Thermodynamik“, Leipzig 1887 (1, стр. 29 и далее) он обходится без этой предпосылки. Gustav Zeuner (родился в 1828 г.) в 1853—1857 был редактором журнала „Civilingenieur“; с 1857 г. — профессор механики и теории машин в Цюрихе; с 1865 г. — директор Политехникума в Цюрихе. с 1871 г. — директор Горной академии в Фрейбурге; с 1875 г. — директор Политехникума в Дрездене.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ, ДАННЫЕ ТОМСОНОМ И КЛАУЗИУСОМ 93

тезы. Наконец, и Гельмгольц¹ — в своих новейших работах о механических следствиях, вытекающих из второго начала, исследовал условия, при которых кинетическая энергия молекулы может обладать существенными свойствами температуры. Он определяет *температуру* как функцию, которая: 1) является интегрирующим знаменателем в дифференциальном уравнении $dQ=0$; 2) имеет одинаковую величину для двух тел, если между ними не происходит теплового обмена, и 3) удовлетворяет условию, что два тела, находящиеся в тепловом равновесии с третьим телом, находятся в таком же равновесии и между собою. Если в какой-либо системе точек имеются только две различные группы движений, *стационарные*, с бесконечно малыми изменениями скоростей, и *циклические*, в которых координаты отдельных точек изменяются лишь незначительно, то при известных условиях, действительно, можно полученную или отданную теплоту рассматривать как работу dQ , переданную циклическим движениям или отнятую от них. А именно, если в системе происходит только *одно* циклическое движение (*моноклическая система*) или же если все циклические движения зависят помимо положения точек еще только от какой-нибудь единственной функции, например от какой-либо скорости (*связанные полициклические* или *общие моноциклические системы*), то кинетическая энергия системы является одним из интегрирующих знаменателей дифференциального уравнения $dQ=0$. Если при этом между двумя или многими моноциклическими системами физически нельзя установить обмена кинетической энергией иначе, как, соединив их в новую моноциклическую систему, то равенство упомянутого интегрирующего знаменателя решает вопрос о том, происходит ли при таком соединении (*Koppelung*) обмен кинетической энергией и удовлетворяются ли таким образом второе и третье из указанных выше условий. *Итак, теплоту тела можно рассматривать как энергию циклических движений моноциклической системы, а температура является кинетической энергией этих движений.*

Все эти исследования о *чисто-механическом* значении тепловых понятий, приведенные нами здесь в интересах связности изложения, относятся собственно не только по времени, но и по своему характеру к *следующему периоду*. Упоминание о них в настоящем месте важно для нас в том отношении, что именно они особенно ясно показывают тот путь, по которому направилось развитие науки, и те цели, к которым она должна была привести, а именно — к дальнейшему проникновению в *сущность материи*. Когда установилось представление о теплоте, как только о некотором роде движения, и именно — молекулярного движения, то при дальнейших исследованиях в области теплоты должно было становиться все более ясным, что в этой области можно будет придти к совершенно надежным общим выводам лишь после того, как будут выработаны более ясные представления о строении того, что движется, о *строении материи*. Многочисленные различные и противо-

¹ „Sitzungsber. der Berl. Akad.“, стр. 159 и 311, 1884; „Journal für rein. u. angew. Mathem.“, XCVII, стр. 111 и 317. Следующие положения изложены по С. Heim, Die Lehre von der Energie, Leipzig 1887.

94 СЛЕДСТВИЯ ИЗ МЕХАНИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ТЕПЛОТЫ

речащие друг другу воззрения, многочисленные споры о началах теории теплоты, противоположные мнения о надежности выводов, даже самое разнообразие предложенных доказательств — все это показывало, что открытие механического эквивалента теплоты и возникновение новых воззрений на сущность теплоты привели не к завершению нового учения, а лишь к началу его. После этого предубежденность физиков против фундаментальных исследований о сущности материи начала постепенно исчезать, и новый пересмотр, по крайней мере, этих понятий, становился все более неизбежным. *Представляет ли собою теплота чисто поступательное движение молекул или же она предполагает также и их вращение? Чем отличаются друг от друга тепловые движения в газах, жидкостях и твердых телах, в какой мере они тормозятся молекулярными силами и насколько глубоко влияет на них внутренняя работа в веществах? Являются ли молекулярные силы только притягательными и достаточно ли живой силы теплового движения для объяснения упругости и т. п., или же теперь, когда уже нельзя приписывать теплороду отталкивательной силы, последнюю следует перенести на весомую материю? Нельзя ли даже совершенно исключить элементарные молекулярные силы и объяснить все явления природы движениями мельчайших частиц материи?* Все эти вопросы требовали своего разрешения и побуждали даже физиков-экспериментаторов вернуться к умозрениям о сущности материи. Что последние осознали эту потребность и изъявили готовность пойти навстречу, становилось все более ясным по мере приближения к концу 60-х годов. Но так как не было никаких сомнений в том, что в твердых телах молекулярные силы должны проявляться наиболее сильно, а в газах наиболее слабо, то по началу отвлеклись от исследования твердых и жидких тел и разработали только механическую теорию газов. Сознательное начало такой систематической разработки было положено Клаузиусом в 1857 г. в его труде «Über die Art der Bewegung, welche wir Wärme nennen» («О роде движения, которое мы называем теплотой»). Эта работа вводит нас вполне определенно в последнюю фазу теории теплоты и одновременно в *новейший период физики*, с нее мы и начнем наше положение в следующем отделе.

Теперь же нам остается упомянуть о некоторых положениях, выведенных почти одновременно У. Томсоном, Клаузиусом, Ранкином и др., в скором времени после установления новой теории теплоты. *Из расхождения значения, полученного для механического эквивалента единицы теплоты Джоулем, с тем числом, которое получается из удельной теплоемкости воздуха*, легко пришли к тому выводу, что число 0,2669, полученное Деларошем и Бераром для удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении, должно быть слишком велико. В 1859 г. Ранкин исчислил эту величину обратно из механического эквивалента Джоуля и нашел, что она должна быть равна 0,2404¹, — результат, оказавшийся очень близким к числу 0,2375, полученному позднее экспериментальным путем Реньо. В 1849 г. Джемс Томсон

¹ „Edinburgh Trans.“, XX, стр. 191; доложено 2 декабря 1850 г.; „Pogg. Ann.“, LXXXI, стр. 175, 1850.

УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ. ТОЧКА ЗАМЕРЗАНИЯ 95

вывел из формул Клапейрона закон, согласно которому *точка замерзания воды должна зависеть от давления*¹. У. Томсон² подтвердил этот закон экспериментальным путем и показал, что вообще точка плавления твердого тела с повышением давления понижается, если это тело в твердом состоянии занимает больший объем, чем в жидком, и, наоборот, повышается при обратном соотношении объемов. В частности, для точки замерзания воды он нашел понижение на $0,0135^\circ \text{F}$ на каждую атмосферу давления. Клаузиус присоединился к этому выводу и со своей стороны показал, что и из его понимания закона Карно вытекает зависимость точки замерзания от давления³. Очень важный для теории паровых машин (хотя и принятый не без возражений) вывод из первого начала теории теплоты был сделан одновременно Ранкиным⁴ и Клаузиусом⁵, а именно, что насыщенный водяной пар должен при расширении частью оседать в жидком виде, а при сжатии должен переходить в перегретый пар⁶. Еще важнее для всей теплотехники был новый метод оценки работоспособности паровых машин, разработанный У. Томсоном⁷, Ранкиным⁸ и Клаузиусом⁹ при исследовании ими

¹ „Edinburgh Trans.", XVI, стр. 575, 1849. James Thomson — старший брат Уильяма, гражданский инженер в Глазго.

² „Exp. on the effect of pressure in lowering the freezing point of water", „Philosophical Magazine" (3), XXXVII, стр. 123, 1850; „Pogg. Ann.", XXXI стр. 163.

³ „Pogg. Ann.", LXXXI, стр. 168, 1850.

⁴ „Edinburgh Trans", XX, стр. 147, 1853 (доложено 4 февраля 1850 г.). Ранкин говорит: „Когда температура данной массы водяного пара повышается и в то же время ее упругость поддерживается на максимуме путем сжатия, то вызванная сжатием теплота оказывается больше той, какая была бы нужна для повышения температуры, и тогда избыток тепла отдается на сторону. С другой стороны, когда насыщенный пар расширяется и одновременно поддерживается при температуре насыщения, то тепло, расходуемое на расширение, больше того, какое освобождается благодаря понижению температуры; следовательно, эта потеря тепла должна быть покрыта извне; в противном случае часть пара должна была бы конденсироваться, — чтобы дать теплоту, необходимую для расширения остальной части пара".

⁵ „Pogg. Ann.", LXXIX, стр. 391, 1850. Клаузиус сопровождает свой вывод следующим замечанием: „Конечно, этот вывод прямо противоречит приведенным выше обычным представлениям, но, я полагаю, он не находится в противоречии ни с одним опытным фактом".

⁶ У. Томсон отмечает по поводу этих выводов („Philosophical Magazine" (3), XXXVII, стр. 387; „Pogg. Ann.", LXXXI, стр. 477): так как в струе пара, вырывающегося из парового котла, можно держать руку не обжигаясь, то вывод Ранкина должен быть неверен или же пар при своем истечении должен получать теплоту. В заключение он приходит к выводу, что теплота, необходимая для предотвращения сжижения пара, получается в результате трения при его истечении („Edinburgh Trans.", XX, стр. 287—288).

⁷ „On the Dynamical Theory of Heat", „Edinburgh Trans.", XX, стр. 261.

⁸ „Edinburgh Trans.", XX, стр. 147, 195 и 205; „Phil. Trans.", CXLIV, стр. 115, 1854. Об обширном труде Ранкина „A manual on the steam engine and other prime movers" (London and Glasgow 1859) Рюльман („Handbuch der mechanischen Wärmetheorie", II, стр. 961, 1885) говорит следующее: „Некоторые части этого сочинения, по отзывам авторитетных специалистов, еще не превзойдены новейшими изложениями".

⁹ „Anwendung der mechanischen Wärmetheorie auf die Dampfmaschine", „Pogg. Ann.", XCVII, стр. 441 и 513, 1856. „Die mechanische Wärmetheorie", стр. 247.

96 ТЕОРИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ МАШИН

второго начала теории теплоты, — метод, намеченный уже в сочинении Карно и находившийся в противоречии с господствовавшей до того времени теорией Памбура. По Клаузиусу максимум работы, которую можно получить от идеальной паровой машины, выражается формулой:

$$W = \frac{Q}{A} \cdot \frac{T_1 - T_0}{T_1},$$

где Q обозначает все количество израсходованного тепла, A — механический эквивалент теплоты, T_1 — абсолютную температуру более теплого, T_0 — абсолютную температуру более холодного тела ¹. Из этой формулы следовал показавшийся в то время поразительным вывод, что даже в наиболее совершенной паровой машине не все потребленное ею тепло может быть превращено в работу; более того, — что в силу

¹ Клаузиус доказывает эту формулу следующим образом („Pogg. Ann.", ХСVII, стр. 453): „Допустим, что Q_1 обозначает те количества тепла, которые последовательно принимает изменяющееся тело, и T_1 — температуры этого тела после того, как оно принимает соответствующие количества тепла; остается еще температура T_0 при которой телу сообщается или же от него отнимается некоторое неизвестное по величине количество

тепла Q_0 . Разложим тогда интеграл второго начала $\int \frac{dQ}{T} = -N$ на две части, из которых одна распространяется на известную величину теплоты Q_1 , а другая на неизвестную Q_0 , и мы получим, так как T_0 имеет известное значение:

$$\int_0^{Q_1} \frac{dQ}{T} + \frac{Q_0}{T_0} = -N,$$

или

$$Q_0 = -T_0 \int_0^{Q_1} \frac{dQ}{T} - T_0 N.$$

Но так как все рассматриваемое количество тепла равно $Q_1 + Q_0$, то вся работа

$$W = \frac{1}{A} (Q_1 + Q_0),$$

или

$$W = \frac{1}{A} \left(Q_1 - T_0 \int_0^{Q_1} \frac{dQ}{T} - T_0 N \right).$$

Если теперь принять, что соответствующий круговой процесс является обратимым и что количество тепла Q_1 сообщается при постоянной температуре T , то $N=0$ и

$$\int_0^{Q_1} \frac{dQ}{dT} = \frac{Q_1}{T_1},$$

а отсюда прямо следует:

$$W = \frac{Q_1}{A} \cdot \frac{T_1 - T_0}{T_1}.$$

МЕХАНИКА 97

существующих взаимоотношений, при значительной высоте температуры всех применяемых тел над абсолютным нулем, большая часть тепла должна бесполезно переходить с одной части машины на другую или тратиться на изменение внутреннего состояния тела.

Эти неблагоприятные результаты, полученные по отношению к работоспособности паровых машин, побудили заняться опытами по устройству *других термодинамических машин*. Из вышеприведенной формулы для максимальной работы термодинамической машины было ясно, что работоспособность машины значительно возрастает с увеличением разности температур $T_1—T_0$. Так как температуру конденсатора нельзя понизить ниже известного предела, то представлялось целесообразным *насколько возможно повысить температуру T_1* . Последнее представлялось легче достижимым с воздухом, чем с насыщенным паром; поэтому так называемые *калорические* машины, или машины с *нагретым воздухом*, были встречены очень сочувственно. В начале пятидесятых годов появилось очень много работ, частью весьма благоприятных, о действии и теории изобретенной в 1850 г. Эриксоном ¹ калорической машины, то же самое повторилось и в начале 60-х годов, когда Эриксон описал усовершенствованную калорическую машину. В конце концов, однако, выяснилось, что эти машины, не имея никаких теоретических преимуществ перед паровыми, в практическом отношении не в состоянии соперничать с ними ². Такая же участь, казалось, угрожала изобретенной в 1860 г. Ленуаром ³ газовой машине, однако после того как Отто ее усовершенствовал в 1865 г., она благодаря своему удобству и дешевизне стала получать все большее применение в небольших промышленных предприятиях.

МЕХАНИКА (приблизительно от 1840 до 1860 г.). Для *аналитической механики* золотой век миновал; в виде завершенной науки она была изложена в более новых учебниках Пуассона (1-е издание 1811 г., 2-е издание 1833 г. и т. д.) и Дюгамеля (1845—1846) и др. *Синтетический метод*, в свою очередь, тоже снова упрочился в механике и требовал лишь систематической разработки, более приспособ-

¹ Машины, действующие нагретым воздухом, были изобретены уже в начале нашего столетия Ньепсом (1806 г.), Каньяр-Латуром (1809 г.), Монгольфье и Дэмом (1816 г.), Штирлингом (1827 г.) и Эриксоном (1833 г.), но потом были оставлены. Johann Ericsson (1803—1899 г., род. в Швеции, умер в США) усовершенствовал в 1826 г. паровой винт, а в 1861 г. построил панцирное судно „Монитор“.

² Клаузиус в своей работе 1856 г. („Pogg. Ann.“, XCVII, стр. 474) говорит о калорических машинах: „Таким образом легко понять то, что было уже высказано С Карно и вслед за ним многими другими авторами, а именно, что для наиболее выгодного устройства тепловых машин необходимо, главным образом, стараться увеличивать температурный интервал $T_1—T_0$. Так, например, существенных преимуществ для калорических машин перед паровыми можно ожидать, лишь при том условии, если удастся добиться того, что первые будут работать при значительно более высоких температурах, которые для паровых машин не допустимы вследствие опасности взрыва. Но, с другой стороны, того же самого можно достигнуть с помощью перегретого пара, ибо как только пар отделен от жидкости, его можно так же безопасно дальше нагревать, как постоянный газ“. — Однако, как известно, и для калорических машин высокие температуры *были* вредны, так как при них машина не может длительно сохранять ровного хода.

³ Патенты на газовые машины взяли в 1858 г. итальянцы Барсанти и Маттеуччи и француз Гюгон; в 1860 г. — Льюис; в 1866 г. Отто и Ланген в Кельне.

98 ПАРАЛЛЕЛОГРАММ СИЛ И ЕГО ПОПЫТКИ ОБОСНОВАНИЯ

ленной для нужд преподавания. В результате условия теперь сложились таким образом, что *экспериментальная индуктивная* механика снова взяла перевес над математической дедуктивной, что от недавно еще излюбленной механики твердых тел обратились к *механике жидкостей и газов* или даже прямо к *молекулярной механике*. Однако при тогдашних условиях это привело к *разрозненности* механических работ, как в математической, так и в эмпирической области. В течение этого периода исследования механиков отличаются той особенностью, что они вызываются не столько самостоятельными связными идеями, возникающими в области самой механики, сколько особыми целями, зачастую вызванными запросами других физических дисциплин. В особенности это относится к работам в области молекулярной механики. Потребность создания молекулярной физики чувствовалась все сильнее и сильнее; но в этой области работали без ясных руководящих идей о возможном ходе исследования; каждый физик работал над проблемой, где в силу личной склонности или по особым внешним условиям он ожидал наибольших результатов.

Понятие о силе неизменно приводило к новым загадкам. Параллелограмм движений, который был выведен Ньютоном и Кантом путем допущения различных относительных движений в различных относительных пространствах и был признан ими достаточным для обоснования параллелограмма сил, теперь считался уже недостаточным. Последний пытались прямо вывести из господствовавших тогда представлений о притягательных и отталкивательных силах, действующих непосредственно на расстоянии, однако при этом все же не могли придти к полному согласию относительно надежности приведенных доказательств. За основу этих доказательств большею частью принимали, в качестве *физической аксиомы*, положение, что *равнодействующая двух равных сил направлена по линии, делящей пополам угол, образуемый этими силами*. Для большей доказательности этого положения указывали на то соображение, что нет никаких оснований для того, чтобы равнодействующая пошла ближе к одной или другой составляющей, но при этом из осторожности ¹ порой еще прибавляли, что эта аксиома подтверждается опытом. Последнее замечание ясно показывало, что эта аксиома все-таки не считалась совершенно безукоризненной, и потому-то многие математики продолжали свои изыскания с целью найти более наглядные или же более принципиально обоснованные доказательства параллелограмма сил.

¹ См. „Lehrbuch der analytischen Mechanik“ von Duhamel, übersetzt von Schlömilch I, стр. 9 и 10, Leipzig 1858. Для того чтобы показать, что при неравных силах их равнодействующая по своему направлению совпадает с диагональю параллелограмма, построенного на силах, Дюгамель делит отрезки, представляющие силы, на определенное число равных частей и из точек деления проводит линии, параллельные сторонам параллелограмма, другими словами, он разбивает параллелограмм сил на ромбы. Пользуясь, помимо приведенного выше, еще и другим допущением, что *силы можно перемещать по их направлению* и что *силы, имеющие одинаковое направление, прямо суммируются*, он смог показать, что две подлежащие сложению силы могут быть перенесены параллельно самим себе в другой конец диагонали, чем, в сущности, доказательство и доводится до конца.

ПАРАЛЛЕЛОГРАММ СИЛ И ЕГО ПОПЫТКИ ОБОСНОВАНИЯ 99

Гирн¹ положил в основание своего доказательства, — многие признавали это более правильным — *общую проблему проектирования силы на какое-либо определенное направление и попытался ограничиться допущением, что проекция силы P на определенное направление, образующее с направлением силы угол θ , равна $Pf(\theta)$* , причем, конечно, в результате доказательства получилось равенство $f(\theta)=\cos\theta$. Подобным же образом, но только в обратном порядке, А. фон-Эттингсгаузен² для двух прямоугольных составляющих положил угол α между одной из составляющих и равнодействующей равным функции отношения между составляющими, т. е. $\alpha=f(Q/P)$, а затем путем дифференцирования и интегрирования доказал, что эта функция является круговой, а именно $\alpha=\arctg(P/Q)$ или $\operatorname{tg}\alpha=(Q/P)$. Мебиус³ признал достаточным применить для доказательства параллелограмма сил только два следующих положения: «1) Равнодействующая сил, лежащих на одной и той же прямой, равна алгебраической сумме их. 2) Если при наличии двух или большего числа сил, действующих на одну точку, каждую из этих сил изменить по величине в одном и том же отношении, не изменяя при этом ее направления, то и величина равнодействующей изменится в том же самом отношении, но направление ее останется неизменным». Однако при этом он без всяких оговорок принимает, что проекции трех находящихся в равновесии сил на любую прямую, в свою очередь находятся в равновесии. После Мебиуса Крелле⁴ в своем журнале дал сразу несколько доказательств параллелограмма сил, из которых одно было основано на законе рычага.

¹ „Philosophical Magazine" (3), XXIX, стр. 258, 1846. Если три силы P , Q и R , лежащие в одной и той же плоскости и образующие с какою-либо прямою в той же плоскости углы θ , $\theta+\alpha$ и $\theta+\beta$, находится в равновесии, то должно иметь место равенство $Pf(\theta)+Qf(\alpha+\theta)+Rf(\beta+\theta)=0$ или, если положить $\theta=0$, $Pf(0)+Qf(\alpha)+Rf(\beta)=0$. Дифференцируя последнее уравнение два раза, получаем:

$Pf'(0)+Qf'(\alpha)+Rf'(\beta)=0$ $Pf''(0)+Qf''(\alpha)+Rf''(\beta)=0$. Если два из этих уравнений помножить на соответствующие коэффициенты λ и μ и сложить с третьим, то получается $f''(\alpha)+\lambda f'(\alpha)+\mu f(\alpha)=0$ или также $f''(\beta)+\lambda f'(\beta)+\mu f(\beta)=0$, откуда следует, что вообще $f''(\theta)+\lambda f'(\theta)+\mu f(\theta)=0$.

Интегрирование последнего уравнения дает $f(\theta)=Ae^{a\theta}+Be^{b\theta}$ или, так как функция $f(\theta)$ должна быть периодической, $f(\theta)=A\cos n\theta+B\sin n\theta$. Если, далее, принять, что при $\theta=0$ значение $f(0)$ должно быть равно единице, а при $\theta=\pi/2$ значение $f(\pi/2)$ должно быть равно нулю, легко придти к окончательному выводу, что $f(\theta)=\cos\theta$.

² „Winer Sitzungsber.", II, стр. 155, 1849.

³ „Ber. der Gesellsch. d. Wissensch." zu Leipzig, стр. 10, 1850. А. F. Möbius (1790—1868) — профессор астрономии в Лейпциге.

⁴ „Journ. für reine und angew. Mathematik", XLIV, стр. 220, 1852.

100 ПАРАЛЛЕЛОГРАММ СИЛ

Затем два новых доказательства были даны В. Матцка¹ и Раабе² в 1856 г., а после них в 1857 г. Шлёмильх³ попытался улучшить аналитическое доказательство, построенное в духе Эттингсгаузена, и придать ему большую силу.

Однако все эти доказательства, — а приведенными выше число их далеко еще не исчерпывается, — поскольку они, выходя за пределы движения, стремились достичь своей цели, основываясь на понятии силы, должны были страдать неясностью и ненадежностью. Мы уже раньше отметили, что даже *сложение сил, лежащих на одной прямой*, не вполне бесспорно и даже мало понятно, поэтому неудивительно, что *при сложении сил различных направлений* эти трудности еще значительно возрастают. Закон параллелограмма сил относится к числу проблем о передаче сил, *но все эти передачи могут происходить лишь в материи, поэтому им свойственны и все те неясности, которые связаны с понятием о материи*; ниже мы даже увидим, что, в конце концов, *они и составляют самую сущность понятия о материи*. Ни в понятии о силе, ни в понятии о движении не заключается представления о взаимодействии многих сил или движений, или даже о возможности такого взаимодействия, а тем менее о его характере. Поэтому никакой математик не выведет из одних понятий силы и движения параллелограмма сил, и всякие доказательства, на которых будут основываться такие выводы, являются лишь уловками. *От невольного вторжения последних не спасают, как это показывают приведенные выше доказательства параллелограмма сил, и длинные ряды математических заключений, в которых общие гипотезы подвергаются последующему уточнению*, В основу всякого доказательства параллелограмма сил приходится положить определенные допущения о простейших случаях этой проблемы, которые представляются либо ясными сами по себе, либо твердо установленными на опыте, а из них уже затем выводится общий закон. Эти допущения могут относиться к соотношению двух сил или же к проекции одной силы на определенное направление, но они должны содержать в себе определенные соотношения мер; так, например, доказательства, которые для случая проекции силы стараются ограничиться лишь одним допущением о некоторой неопределенной зависимости величины силы от угла проекции, все-таки вынуждены в процессе своего развития считать силу определенной для отдельных углов проекции, как, например, для 0 или 90°. Ввиду сказанного становятся бесцельными большинство столь искусно построенных доказательств, которые стремятся не к уяснению общего закона с помощью простых, ясных самих по себе частных случаев, а к выводу их исключительно из понятия силы как причины движения, оставляя совершенно в стороне загадку о материи. И действительно, в новейшее время доказательства параллелограмма сил все больше исчезают из оборота, поэтому в учебниках теоретической механики этот закон просто

¹ „Abhandl. d. böhm. Ges. d. Wissensch.“ (5), IX, стр. 1.

² „Vierteljahrschrift d. naturf. Ges. in Zurich“, стр. 223, 1856.

³ „Zeitschr. f. Mathem. u. Physik“, стр. 84, 1857. О. Schlömilch (1823—1901) известный математик издатель названного журнала.

ВРАЩАТЕЛЬНЫЕ ДВИЖЕНИЯ 101

принимается в качестве *эмпирически или теоретико-познавательного обосновываемого фундамента всякого представления о силе.*

Если здесь приходилось иметь дело с трудностями скорее *метафизического характера*, лежавшими вне пределов математики, то в этот же период механики встретились и с другими трудностями чисто математического порядка. С середины прошлого столетия, когда механику точки начали расширять до механики физического тела, много и интенсивно занимались *вращательными движениями*; а в последнее время, главным образом благодаря трудам Пуансо, эти проблемы были доведены до известной степени законченности. Теперь стали от более простых проблем переходить к более сложным, с ними связанным. Больше всего привлекли к себе внимание вопросы, разбиравшиеся, впрочем, и раньше, о *движениях вращающихся тел под влиянием внешних возмущающих сил и о собственных движениях отдельных тел на вращающихся системах*; и хотя средства математики были еще как будто недостаточны для полного разрешения этих проблем, однако тот факт, что мы сами находимся на подобной вращающейся системе, на земле, побуждал ученых вновь заняться этими вопросами и притом не только в математическом, но также и в *экспериментальном* направлении.

Тридцать лет спустя после измерений Бенценберга, Ф. Рейх¹ снова занялся *опытами с падающим телами* с тем, чтобы вновь детально

¹ Ferdinand Reich (1799—1882, профессор физики): „Fallversuche über die Umdrehung der Erde“, Freiberg 1832. Несколько лет спустя после этих опытов Рейх, подобно Кавендишу, определил с помощью крутильных весов среднюю плотность земли („Versuche über die mittlere Dichte der Erde etc.“, Freiberg 1838) и нашел для нее число 5,44. Несколько позднее тем же способом Фрэнсис Бели („Experiments with the Torsion Rod etc.“, London 1843; „Philosophical Magazine“ (3), XXI, стр. 111; „Pogg. Ann.“, LVII, стр. 453) получил 5,67. При повторных своих опытах Рейх затем получил более правильное число 5,5832, с вероятною ошибкою в 0,0149 („Pogg. Ann.“, LXXXV, стр. 189). И. Плана вычислил, подобно Лапласу, среднюю плотность земли из увеличения ее плотности по направлению к центру в результате вращательного ее движения, но пришел к маловероятным результатам („Astr. Nachrichten“, XXXV, стр. 177, 1852). Эри использовал выведенное математическим путем положение, что точка внутри шара испытывает со стороны последнего притяжение, равное притяжению шара, имеющему радиус, равный расстоянию притягиваемой точки от центра шара. Наблюдая с помощью качаний маятника силу тяжести на поверхности земли и на дне шахты медных Корнуэлльских рудников, он сначала (1826—1828 г.) не получил удовлетворительных результатов; но затем, в 1854 г., он очень тщательно наладил такие же наблюдения вместе с семью помощниками в угольных копях Нортумберланда. Однако из принятой им плотности земной коры между верхним и нижним пунктами наблюдения он получил для средней плотности земли очень большое и маловероятное число $6,566 \pm 0,0182$ („Phil. Trans.“, стр. 297, 1856; „Pogg. Ann.“, XCIII, стр. 599). Гаутон полагал, что взятое Эри для плотности земной коры число 2,5 слишком велико, так как он не принял во внимание морей; взяв вместо 2,5 число 2,059, он из измерений Эри получил для средней плотности земли 5,489 („Philosophical Magazine“ (4), XII, стр. 50, 1856; „Pogg. Ann.“, XCIX, стр. 332). Однако другие физики указывали, что вследствие ненадежности подобных оценок метод Эри не может дать большей точности, чем метод Маскелайна и Хеттона. Поэтому Жолли в семидесятых годах снова предпринял эти измерения по совершенно новому методу („Wiedem. Ann.“, XIV, стр. 331, 1881). Он установил в башне очень чувствительные весы, к чашкам которых при помощи проволок в 21,005 м длиной были подвешены две другие чаш-

102 ВЗГЛЯДЫ ФИЗИКОВ НА ОТКЛОНЕНИЕ ПАДАЮЩИХ ТЕЛ К ЮГУ

исследовать вызываемые вращением земли *отклонения падающих тел от отвесной линии*. В результате многочисленных опытов в шахте «Трех братьев» во Фрейберге в 1831 г. он нашел, что при высоте падения в 158,5407 м восточное отклонение составило 28,396 мм. Но, *кроме того, и здесь, как у Гульельмини в Болонье и у Бенценберга в Гамбурге, выявилось и необъяснимое южное отклонение*, а именно в 4,374 мм. Рейх говорит по поводу этого отклонения следующее: *«Что касается последнего, то его величина не настолько превосходит вероятную ошибку, чтобы его признать достоверным; однако видишь себя вынужденным повторить слова Бенцинберга: «Странной все-таки остается эта тенденция ошибок в южном направлении»*¹. Тем не менее, в это время большинство физиков придерживалось отрицательного вывода о южном отклонении, который был обоснован Лапласом², Гауссом³ и Ольберсом⁴ в начале нынешнего столетия. Гаусс нашел, что восточное отклонение пропорционально угловой скорости вращающейся земли, а южное пропорционально ее квадрату, что поэтому последнее совершенно незаметно и что это отношение не изменилось бы, если бы даже принять в расчет сопротивление воздуха⁵. Ольберс сначала пришел к такой величине для южного отклонения, которая совершенно согласовалась с результатами, полученными Гульельмини и Бенценбергом, но потом, под влиянием указания Гаусса, он согласился, что и по его выводам найденное им южное отклонение компенсируется другим моментом и, таким образом, совершенно исчезает. А именно, если мы будем отличать направление силы тяжести от отвесной линии, которая представляет собой направление равнодействующей силы тяжести и центробежной силы, и обозначим через r радиус земли, через t время падения, а высоту падения, через h

ки. Испытуемое тело весило тогда на нижних чашках больше, чем на верхних, вследствие большей близости к центру земли. Разность этих весов увеличивалась еще тем, что при обоих взвешиваниях на верхней и на нижней чашках под соответствующую чашку ставился один и тот же свинцовый груз. Из разности этих весовых разностей определялось действие свинцового груза, а с помощью известного удельного веса свинца Жолли установил, что средняя плотность земли равна 5,692. Главные дефекты при этих взвешиваниях — это незначительная величина наблюдаемых весовых разностей, а также, пожалуй, слишком большое расстояние между чашками. В настоящее время физики А. Рихарц и Ф. Кениг проводят новые опыты с улучшенными весами Жолли, причем они поставили себе целью устранить указанные выше недостатки („Wiedem. Ann.", XXIV, стр. №4, 1885).

¹ „Failversuche über die Umdrehung der Erde", стр. 46, 1832.

² „Bull. d. Sciences par la Soc. Philomath." Prairial, an 11, (1803); помещено также в работе Бенценберга, „Versuche über die Umdrehung der Erde", стр. 388.

³ Помещено у Бенценберга, стр. 363.

⁴ Benzenberg, стр. 372. Н. W. Olbers (1758—1840) — практикующий врач в Бремене, знаменитый астроном.

⁵ Там же, стр. 370. Гаусс получает (не принимая в расчет сопротивления воздуха): путь падения = $\frac{1}{2}gt^2 + \frac{1}{6}\cos^2\varphi gn^2t^4, \dots$; восточное отклонение = $\frac{1}{3}\cos\varphi gnt^3, \dots$; южное отклонение = $\frac{1}{6}\cos\varphi\sin\varphi gn^2t^4, \dots$, где n — угловая скорость земли, а φ — высота полюса на месте наблюдения.

ВЗГЛЯДЫ ФИЗИКОВ НА ОТКЛОНЕНИЕ ПАДАЮЩИХ ТЕЛ К ЮГУ 103

продолжительность вращения земли в секундах, через ψ высоту полюса и через g' ускорение падения под влиянием тяготения и центробежной силы, то согласно Ольберсу отклонение (южное) отвесной линии от направления тяготения будет:

$$\lambda = \frac{\arcsin 2\psi}{g'} \left(\frac{\pi}{\tau} \right)^2,$$

но отклонение (южное) упавшего тела от линии тяготения:

$$\lambda' = t^2 r \sin 2\psi \left(\frac{\pi}{\tau} \right)^2,$$

а потому южное отклонение упавшего тела от отвесной линии:

$$\lambda' - \lambda = \left(t^2 - \frac{a}{g'} \right) r \sin 2\psi \left(\frac{\pi}{\tau} \right)^2.$$

Если бы тело падало в пустоте, то было бы $t^2 = a/g$ и соответственно с этим $\lambda' - \lambda = 0$; но вследствие сопротивления воздуха получается $t^2 > a/g$, и $\lambda' - \lambda$ получает некоторую определенную величину, которая, как отмечено, согласуется с опытами Бенценберга и Гульельмини. Однако по Гауссу это не может быть верно; так как воздух по отношению к отвесной линии находится в относительном покое, то его сопротивление действует прямо противоположно падению и не может произвести никакого отклонения. Обе величины, t^2 и a/g , должны в одинаковой мере подвергаться влиянию сопротивления воздуха и величина $\lambda' - \lambda$ должна всегда обращаться в нуль¹. Наконец, небольшое отклонение к югу, происходящее оттого, что наверху, в исходной точке падения, центробежная сила несколько больше, чем в конечной точке, он считал совершенно незаметным.

Однако более оживленная дискуссия по поводу этой проблемы возникла в середине сороковых и начале пятидесятых годов после того, как в 1841 г. Эрстед сделал в Собрании британских естествоиспытателей сообщение о южном отклонении падающих тел². После него Дж. Гершель объяснил это отклонение электрическими земными то-

¹ Так утверждает Ольберс: но в действительности все-таки остается под вопросом, не действует ли воздух на падающее тело иначе, чем на висящий груз.

² „On the deviation of falling bodies”, Report British Assoc., 1846; сообщение в „Silliman's Journal” (2), III, стр. 138, 1847. Эрстед выразил пожелание, чтобы Съезд британских естествоиспытателей организовал и финансировал новые измерения, так как методы измерения в последнее время значительно усовершенствовались и все механические работы в Англии достигли большой высоты; при этом можно было бы одновременно измерить скорость падения, а также сопротивление воздуха и газов, и, наконец, здесь можно было бы применить с большой пользой уитстонский метод измерения времени.

ВОЗЗРЕНИЯ ДЖ. ГЕРТЕЛЯ И ЭРСТЕДА

ками, которые пробегают параллельно кругам широты. Эти токи возбуждают в падающем теле индукционные токи и тем самым толкают его к югу с силою, пропорциональной высоте падения. Эрстед сначала склонялся к этому мнению, но потом примкнул к Грове, который указал, что земные токи находятся как к югу, так и к северу от падающего тела и, следовательно, их действия должны взаимно уничтожаться. Он предложил установить вертикально где-нибудь, например, в глубокой шахте, высокую герметически закрывающуюся трубку и произвести в ней опыты с падающими телами при отсутствии всякого бокового движения воздуха, причем эти опыты могут быть произведены как в безвоздушном пространстве, так и в различных газах. Эти опыты должны были иметь своей целью опять-таки проверку южного отклонения. В. В. Рундель¹ произвел после этого опыты над падением тел в шахте глубиною в $\frac{1}{4}$ английской мили, но нашел для южного отклонения удивительно большое число от 10 до 20 дюйм. По мнению Уильяма Редфильда, определенно не знавшего о работах Гаусса и Ольберса, южное отклонение вполне объясняется тем обстоятельством, что центробежная сила направлена не так, как сила тяжести, т. е. к центру земли, а параллельно плоскости экватора, и потому она дает с силою тяжести равнодействующую, которая в северном полушарии отклонена от вертикали к югу². Вскоре после того Фредерик Пти³, директор астрономической обсерватории в Тулузе, предложил это же самое объяснение в качестве нового, но вполне подходящего и даже очевидного.

Дюпре⁴ исправил ошибку Пти и затем сам исчислил южное отклонение совершенно так же, как его определил Ольберс, который затем

¹ „The Mechanic's Magazine by Robertson", XLVIII, стр. 485; „Die Fortschr. d. Physik im Jahre 1848", IV, стр. 62.

² „Effects of the Earth's Rotation upon Falling Bodies and upon the Atmosphere", „Silliman's American Journal of Science and Art" (2), III, стр. 283, 1847. На стр. 451 того же тома помещена поправка (без имени), в которой обращается внимание на то обстоятельство, что Редфильд объясняет не так называемое южное отклонение, а отклонение отвесной линии от направления тяготения. W. C. Redfield (1879—1857)— механик в Нью-Йорке.

³ „Comptes rendus", XXXIII, стр. 193, 1851. Слова Пти звучат прямо наивно: Аббади мне сообщил, что только недавно в Германии наблюдали отклонение к югу, рассматриваемое, по его словам, различными физиками, которые им занимались, как необъяснимая аномалия, обязанная своим происхождением просто ошибкам наблюдения. Я почти тотчас же указал Аббади, что эта мнимая аномалия является, наоборот, подтверждением вращательного движения земли и что она происходит вследствие расхождения между параллелью и вертикалью, направленной с востока на запад, в которой движутся падающие тела, повинувшись законам Кеплера, тогда как основание вертикали продолжает двигаться вдоль параллели. В ответ на это указание, которое показалось вполне убедительным Аббади, последний предложил мне определить, каково будет отклонение, испытываемое телом, брошенным по вертикали с начальной скоростью от 4 до 500 м... Спустя несколько дней я уведомил Аббади, что отклонение к югу составит не несколько миллиметров, а 50 — 60 м" (стр. 194).

⁴ „Comptes rendus" XXXIV, стр. 102, 1852. Дюпре совершенно правильно говорит по поводу замечаний Пти: „Легко показать, что Пти *по недоразумению* вместо действительного направления силы тяжести взял вертикальное направление, которое дает нить с грузом" (стр. 103) A. Dupre (1808 — 1869) — профессор математики в Ренне.

ТЕОРИЯ ДЮПРЕ 105

отказался от него после работы Гаусса. Согласно Дюпре, отклонение отвесной линии от направления тяготения таково же, как и у Ольберса:

$$d = \frac{\pi^2 R}{86164^2} \sin 2l t^2,$$

а отклонение падающего тела от линии тяготения, если не принимать в расчет сопротивления воздуха, имеет ту же величину. Но если принять во внимание, что падение тела, вследствие сопротивления воздуха, замедляется на определенное время t' против времени t падения его в безвоздушном пространстве, то для отклонения падающего тела от направления силы тяжести получается:

$$d' = \frac{\pi^2 R}{86164^2} \sin 2l (t + t')^2,$$

а для так называемого южного отклонения, т. е. отклонения от отвесной линии:

$$d' - d = \frac{\pi^2 R}{86164^2} \sin 2l [(t + t')^2 - t^2].$$

«Для падения с высоты 100 м,— говорит Дюпре,— мы имеем приблизительно $t=4,5''$, величиною t'^2 можно пренебречь по сравнению с $2lt'$; следовательно, для широты в 45° получается:

$$d' - d = f \cdot 75 \text{ мм.}$$

Отсюда видно, что замедление вследствие сопротивления воздуха на $\frac{1}{10}$ и даже на $\frac{1}{20}$ сек. позволило бы установить опытным путем существование этого рода отклонения». Но этим теоретически дело было доведено до той стадии, на которой его оставили Гаусс и Ольберс. Последующие довольно многочисленные, порою даже значительные работы¹ разрешали эту проблему большей частью в духе Гаусса и получали для южного отклонения, без учета сопротивления воздуха, величину, не превышающую 0,01 мм. Действие сопротивления воздуха, с точки зрения возможного его влияния на отклонение падающих тел, почти уже серьезно не обсуждалось, и найденное Рейхом южное отклонение в 4,374 мм осталось по существу дела неразъясненным, хотя оно и не было сведено к ошибкам наблюдения.

Такие же затруднения, как движение падающих тел, представляло и исследование движения брошенных тел, а также движения артиллерийских снарядов; только у последних, помимо вращения земли, приходилось принимать в расчет еще и вращение движущихся тел. После того как Пуассон в 1838 и 1839 гг. исследовал в двух работах проблему

¹ См. *P. A. Hansen*, Theorie der Pendelbewegung mit Rücksicht auf die Gestalt und Bewegung der Erde; „Neue Schriften d. naturf. Gesellsch. zu Danzig“ V, 1856. Выдержки в „Pogg. Ann.“, XCII, стр. 21; *C. E. Page*, Nouv. Ann. de Mathem. (2), VI, стр. 97, 1867; *H. Resal*, там же, XI, стр. 348, 1872; *H. Bertram*, Probleme der Mechanik mit Bezug auf die Variation der Schwere und der Rotation der Erde, Programm der höheren Bürgerschule in Berlin, стр. 26, 1869.

106 ОТКЛОНЕНИЕ СНАРЯДОВ

отклонения снарядов от вертикальной плоскости, проведенной через направление орудия¹, до настоящего времени появилось множество работ на эту тему и неоднократно велись дискуссии в этой области, однако ни одна из предложенных теорий не получила общего признания. Пожалуй, больше всего приверженцев, по крайней мере, среди физиков, приобрела теория Магнуса, который в 1853 г.² вывел отклонение снарядов только из их *вращения* и из *сопротивления воздуха*. Магнус исходит из предположения, что влияние воздуха остается одним и тем же, движется ли рассматриваемое тело в воздухе или же воздух движется относительно покоящегося тела, и затем пытается экспериментально установить это влияние. При этом он ссылается на свои исследования³ «Über die Bewegung der Flüssigkeiten» («О движении жидкостей»), 1850 г., где он показал, что если жидкость втекает с известною скоростью в однородную среду, то давление, перпендикулярное к направлению движения, меньше того, которое было бы в состоянии покоя. В соответствии с этим он мог теперь установить (при помощи небольших пламен и т. п.), что струя воздуха, направленная на цилиндр (или шар), вызывает на нем не повышенное, а уменьшенное давление. Когда цилиндр находится в полном покое, то уменьшение давления с обеих сторон одинаково; если же цилиндр вращается около своей оси, то давление на той стороне, которая движется навстречу воздуху, больше, чем на противоположной стороне, оно даже больше, чем в состоянии покоя. Причиной этого является боковое изгибание воздушного тока около тела. Даже у круглых снарядов, выбрасываемых из гладких орудий, вследствие эксцентричного положения их центра тяжести всегда возникает вращение, а, следовательно, и отклонение от плоскости траектории полета; но только отклонение это происходит в различные стороны, так как вращение происходит в различных направлениях. В цилиндрических снарядах из нарезных орудий, нарезы которых идут вправо, отклонение тоже всегда происходит в правую сторону. Это отклонение происходит оттого, что вследствие сопротивления воздуха вершина (головная часть) снаряда несколько отклоняется вправо. Хотя равнодействующая сопротивления и проходит через ось снаряда, но, вообще говоря, она не проходит через центр его тяжести; произойдет ли отклонение вправо или влево, это зависит, правда, еще от того, встретит ли равнодействующая сопротивления ось снаряда выше или ниже центра тяжести; однако в применяемых ныне снарядах, по-видимому, всегда имеет место первое. Происходящее вследствие этого поднятие вершины снаряда остается, однако, почти незаметным, так как вследствие вращения снаряда, действующие на его массу силы, складываются таким образом, что вершина вместо того, чтобы подниматься, движется в сторону, причем у снарядов, вращающихся вправо, — в правую сторону. В результате этого воздух давит и на центр тяжести снаряда в ту же сторону и вызывает, таким образом,

¹ „Sur le mouvement des projectiles dans l'air, en ayant égard á la rotation de la terre", „Journ. École polytechnique", XXVI, 1838. „S. le mouvement d. proj. dans l'air, en ayant égard á leur propre rotation"; там же, XXVII, 1839.

² „Pogg. Ann.". LXXXVIII, стр. 1, 1853.

³ Там же, LXXX, стр. 1, 1850.

ОПЫТ С МАЯТНИКОМ ФУКО 107

известное отклонение. «Одновременно вершина снижается и потому создается впечатление, будто давление воздуха на заднюю часть снаряда *больше*, чем на переднюю, между тем как в действительности оно на переднюю часть больше, чем на часть, лежащую позади центра тяжести»¹.

В самой тесной связи с исследованиями влияния вращения земли на движение тел на ее поверхности находится *знаменитый опыт Фуко с маятником*, который, правда, был вызван этими исследованиями, но в свою очередь тоже послужил толчком к новым многочисленным исследованиям подобного же рода и вызвал повышенный интерес к последним. Свои первые опыты Фуко произвел в подвальном помещении. Маятник ею состоял из стальной проволоки от 0,6 до 1,1 мм в диаметре и 2 м длины и из полированного латунного шара, весившего 5 кг. Шар был снабжен внизу острием, которое давало возможность отмечать направление колебаний и в то же время служило для прикрепления маятника к стене при помощи петли. Когда после пережигания нити, образующей петлю, маятник начинал колебаться, то по прошествии получаса он показывал уже заметное отклонение от первоначального направления своего колебания. Тот же результат, но более заметный, получился при повторении этих опытов в меридианном зале Парижской обсерватории с маятником в 11 м длины. Фуко опубликовал результаты этих исследований в статье «*Démonstration physiques du mouvement de rotation de la terre au moyen pendule*» («Физическое доказательство вращения земли при помощи маятника») ² и высказал в ней, правда,

¹ „Pogg. Ann.", LXXXVIII, стр. 25.

² „Comptes rendus", XXXII, стр. 135, 1850; „Pogg. Ann.", LXXXII, стр. 458. Уже флорентийские академики наблюдали отклонение маятника, но, по-своему обыкновению, не доискивались его причины. А именно, они рекомендовали для измерения времени подвешивать шар маятника не на одной нити, а на двух расходящихся нитях, „так как обыкновенный маятник, подвешенный на одной нити, при свободном ходе (по какой причине — мы в это входить не будем), незаметно отклоняется от своего первоначального пути и к концу, когда он приближается к покою, уже не описывает более вертикальной дуги, но движется как бы по овальной спирали, в которой колебаний нельзя ни различить, ни подсчитать" („Tentamina exp. nat.", стр. 19). Подобные же указания, основанные на этом наблюдении, встречаются в неизданных работах Вивиани, а также у Гарджиони в его „Notizie degli aggrandimenti delle scienze fisiche, accaduti in Toscana" (Firenze 1780), Антинори первый указал на эти места („Pogg. Ann.", доп. том III, стр. 159, 1853). Более основательно и, во всяком случае, гораздо более ясно изложено у Пуансине де-Сиври сохранение плоскости качания в примечании к переводу „Historia naturalis" Плиния (т. XII, стр. 486, Paris 1782). „Имеется средство получить компас без магнита; этого можно достичь с помощью маятника, приведенного в колебание по определенному направлению, отнесенному к каким-либо двум противоположным странам света; ибо корабль при своих поворотах этим не нарушит направления, однажды сообщенного маятнику. Таким образом, следует только поддерживать его в движении при помощи какой-либо равномерной силы, а именно при помощи движущей силы, постоянно направленной сверху вниз" (Dehaut в „Comptes rendus", LI, стр. 575, 1860). Поггендорф справедливо заключает, что эти слова указывают на наличие еще одного предшественника в этом деле, так как Пуансине де-Сиври не был ни математиком, ни физиком, а был литератором и драматическим писателем („Pogg. Ann.", CXII, стр. 495, 1861). Сам Фуко говорит о возникновении своего открытия („Pogg. Ann.", XXXII, стр. 459): „Независимость плоскости колеба-

108 ЗАКОН ВРАЩЕНИЯ МАЯТНИКА ФУКО

без всякого вывода, следующий закон: *Видимое вращение плоскости колебания маятника равно произведению углового движения земли на синус географической широты теста подвеса маятника*¹.

Это прямое наглядное доказательство вращения земли, естественно, возбудило величайший интерес среди всех образованных людей и немедленно вызвало многочисленные работы ученых. Маркс, Кумб, Мариньяк, Юнг, Сильвестр, Таккер, Анстис, Клаузен, Шаар, Габбрайт и Гаутон, Эри, Крэггей, Беллавитис, Вудбург, Эшвейлер и другие уже в 1850 и 1851 гг. дали многочисленные доказательства закона вращения Фуко. Т. Бунт² путем точных измерений при помощи маятника длиной в 53 фут., подвешенного в церкви св. Николая в Бристоле, нашел, что часовое отклонение маятника составляло от $11^{\circ},677$ до $11^{\circ},814$, тогда как теоретически исчисленное отклонение было равно $11^{\circ},763$. Дюфер, Вартман и Мариньяк производили опыты с маятником Фуко в Женеве, Дж. Филиппс в Нью-Йорке, Баден Поуэль в Оксфорде, патер Секки в церкви св. Игнатия в Риме³, Гленс в Гронингене, ван-дер-Виллиген в Девентере, А. Нобль и Кэмпбелл в Музыкальном зале в Квебеке; сам Фуко воспроизвел снова свои опыты в 1855 г. перед многочисленной аудиторией во Дворце выставки в Париже; наконец, в Германии были произведены очень точные опыты в Кельнском соборе, а также в Шпейерском соборе⁴.

При этом неоднократно обнаруживались и *отклонения* от закона вращения Фуко. Г. Кокс устроил таким образом, что два маятника начали одновременно свои колебания в одной и той же вертикальной плоскости, и заметил, что плоскости колебаний с течением времени отнюдь не оставались параллельными. Дюфур, Вартман и Мариньяк нашли, что за 2376 час. маятник отклонился от местного меридиана как начальной плоскости своего колебания на 25° , тогда как такое

ния от точки привеса может быть обнаружена при помощи легко воспроизводимого опыта, который и навел меня на этот путь. Утвердим на оси токарного станка и по ее направлению круглый гибкий стальной прут; затем, выведя его из положения равновесия, приведем его в колебательное движение и предоставим самому себе... Если теперь рукою приведем ось станка во вращательное движение, то увидим, что плоскость колебания не участвует в этом вращении".

¹ Jean Bernard Léon Foucault (1819—1868), с 1845 г. редактор научного отдела „Journal des Débats", с 1855 г. физик при Парижской обсерватории, с 1862 г. член Бюро долгот.

² „Philosophical Magazine" (4), I, стр. 552; II, стр. 37 и сл., 1851.

³ Эти опыты были опубликованы в записках папской академии dei Lincei („Atti Accad. Nuov. Linc.", IV, 1850—1851); католическая церковь после этого признала правомерным учение о движении земли.

⁴ Бравэ теоретически вывел, что конический секундный маятник в Париже уходит вперед почти на три секунды в сутки, когда он вращается с востока на запад, по сравнению с маятником, вращающимся в обратном направлении („Comptes rendus", XXXVII, стр. 166; „Pogg. Ann.", LXXXVI, стр. 315), и подтвердил этот вывод опытами в Парижской обсерватории („Comptes rendus", XXXVIII, стр. 195; „Pogg. Ann.", LXXXVI, стр. 318). Он высказывает по этому поводу следующие широкие ожидания: „На основании предыдущих замечаний можно надеяться, что способность известных веществ вращать плоскость поляризации света и распространять с неодинаковой скоростью эфирные колебания с правым и левым вращением, — получит более полное объяснение" („Pogg. Ann.", LXXXVI, стр. 317).

ЗАКОН ВРАЩЕНИЯ МАЯТНИКА ФУКО 109

же отклонение от перпендикулярной к меридиану плоскости получилось уже за 2110 час.

¹. Дюфур полагал, что такая разница во времени слишком велика, чтобы ее можно было объяснить ошибками наблюдения. Скорее можно думать, что существует какая-то зависящая от общего движения *возмущающая причина, которая отклоняет маятник от плоскости, перпендикулярной к меридиану, больше, чем от плоскости этого последнего*. Эта возмущающая причина проявляется таким образом, что колебания маятника, начинающиеся в плоскости, перпендикулярной к меридиану, становятся эллиптическими, тогда как обычно они оставались точно в одной плоскости. Дюфур полагал, *что этой возмущающей силой может быть центробежная сила вращающейся земли* ². Эти интересные наблюдения нашли много сторонников, но встретили также немало возражений. Зантедески подтвердил их без всяких оговорок, но Уокер пришел к совершенно противоположным результатам, а Моссоти нашел, что влияние азимута на скорость вращения (вообще незаметно. Наконец, Понселе ³ в 1860 г. показал, что даже на полюсе радиус-вектор, проведенный из положения покоя маятника к каждой из его горизонтальных проекций, может двигаться с равномерной скоростью только при совершенно особых условиях, которые практически невыполнимы. Равным образом наблюдавшийся уже флорентийскими академиками регулярный *переход плоских колебаний маятника в эллиптические* снова возбудил удивление наблюдателей, хотя открыть особых причин этого явления и не удалось. Наконец, пришли к заключению, что вернее всего будет искать объяснение всех неправильностей в ходе колебаний маятника и вращения плоскости качаний не во вращении земли, а в случайных, но, тем не менее, почти всегда действующих причинах, как влияние *способа подвеса и пуска маятника, сопротивление воздуха, воздушные токи* и т. п. П. А. Ганзен ⁴ в 1856 г специально показал, что наряду с вращением земли на движение плоскости колебаний оказывает влияние и происходящее в большинстве случаев *вращение шара маятника* (влияние, которое в зависимости от направления вращения либо увеличивает, либо уменьшает скорость вращения плоскости колебаний) и что *сопротивление воздуха* значительно усиливает все возмущающие действия. Этим, казалось, исследование данной проблемы было доведено до известной степени законченности. Актуальный научный интерес к ней все более и более ослабевал; опыт с маятником Фуко из перворазрядной сенсации, вызывавшей всеобщее удивление, превратился в обычный и даже зачастую оставляемый в пренебрежении лекционный эксперимент. Еще в 1858 г. берлинские «*Berichte über die Fortschritte der Physik*» отметили свыше 20 более или менее значительных научных работ по поводу опыта Фуко; но уже в следующем году их число понизилось до трех, а вслед затем оно упало до нуля.

¹ „Comptes rendus“, XXXIII, стр. 13; „Pogg. Ann.“, LXXXIV, стр. 149.

² „Pogg Ann.“, LXXXIV, стр. 150.

³ „Comptes rendus“, LI, стр. 467 и 511.

⁴ „Schriften d. naturforsch. Ges. in Danzig“, т. V, тетр. 1. В извлечении в „Pogg. Ann.“, XCII, стр. 21. P. A. Hansen (1795—1874 г.) — известный астроном в Готе.

Трудности, которые встретились при *математической* разработке явления вращения, побудили физиков и в особенности Фуко *придумать вращательные приборы*, которые позволили бы наглядно вывести законы вращающихся тел. Боненбергер ¹ уже в 1817 г. построил свою маленькую машину для демонстрации явлений вращения небесных тел, состоявшую из шара, подвешенного по способу Кардана в двух подвижных кольцах. И вот в 1852 г. Фуко ² дал под именем *гироскопа* упрощенную, но улучшенную форму этой машины. Гироскоп состоял только из одного диска, вращающегося в кольце около неподвижной оси. Когда диск приводили в быстрое вращение, то кольцо можно было поставить на неподвижное острие штатива, даже таким образом, что аппарат стоял наклонно на острие и диск не падал с острия. С помощью этого гироскопа Фуко прежде всего доказал следующие частные законы ³. *Если оси вращения позволить двигаться только по горизонту, то ось стремится установиться в меридиане и притом таким образом, что вращение прибора происходит так же, как вращение земли; если же оси позволить двигаться в меридиане, то она устанавливается параллельно оси земли.* Вскоре за тем он дал общий закон ⁴: *«Если какое-нибудь тело вращается около одной из своих главных осей и какая-нибудь сила или система сил стремится вызвать другое, не параллельное первому вращению, то конечным эффектом этого является переход оси вращения в положение оси этого второго вращения и притом таким путем, что первоначальное вращение происходит параллельно новому».* Это экспериментальное исследование проблемы вращения возбудило, совершенно так же как и предшествующий опыт с маятником, общий интерес физиков и равным образом вызвало много работ на ту же тему и изобретение нескольких усовершенствованных приборов. Еще в том же томе «Comptes rendus», в котором появились работы Фуко, Персон, Ке и другие напечатали свои статьи по тому же вопросу. Сир ⁵ и Ламарль ⁶ указали, что они еще ранее Фуко, в 1851 г., устроили или описали вращательные приборы, однако при наличии ранее сконструированного аппарата Боненбергера это не могло возбудить особенного внимания. Механик Фессель устроил в 1853 г. свою усовершенствованную вращательную машину Фуко, которую Плюкер ⁷ горячо рекомендовал и сам применял при

¹ „Beschreibung einer Maschine zur Erläuterung des Gesetzes von der Umdrehung der Erde“, Gilbert's Ann., LX, 1818.

² „Comptes rendus“, XXXV, стр. 421, 1852. ³ Там же, стр. 425.

⁴ Там же, стр. 602.

⁵ Сир напечатал в „Cosmos“ (т. I, стр. 603, 1852) письмо некоего Террье, который уже в декабре 1851 г. заказал ему вращательную машину.

⁶ Ламарль сообщил в „Bull. de Brux.“ (т. XIX, стр. 31, 1852), что он еще 5 апреля 1851 г. передал в Брюссельскую академию запечатанный конверт в котором содержалось описание вращательной машины.

⁷ „Pogg. Ann.“, XC, стр. 174. Слова Плюкера характерны для тогдашнего состояния теории вращения: „Пуассон в особой главе своей механики уже определил движение, которое получает тело, вращающееся вокруг своей оси под действием тяжести, — в том случае, когда эта ось может свободно двигаться около одной из своих точек. Равным образом новейшая работа г. Пуансо, — большая заслуга которого заключается в таком изложении яв-

дальнейших исследованиях ¹. В том же году Поггендорф подтвердил хвалебный отзыв Плюкера о машине Фесселя и дал часто затем повторявшиеся популярные доказательства ее законов ¹. Магнус, Уитстон и Баден Поуэль еще в 1854 г. опубликовали важные статьи на ту же тему.

В связи с этими исследованиями движений вращающихся систем находились, по крайней мере, вначале, и знаменитые опыты Плато ² «О явлениях в свободной и не подверженной действию тяжести массе». Его прибор представлял собой открытый сверху сосуд, сделанный из плоских стеклянных пластинок шириной в 25 см, и высотой в 20 см, вклеенных в железную раму. Сосуд наполнялся смесью воды и алкоголя, в которой плавала масса оливкового масла равного удельного веса; находясь под влиянием только силы сцепления своих частиц, она принимала форму шара ³. Через середину сосуда проходила тонкая железная ось, на которой, на половине ее высоты, находился перпендикулярный к ней диск в 35 мм в диаметре; этой оси можно было извне сообщать вращательное движение. Когда масляный шар помещали на диск, предварительно смазанный маслом, то он распределялся симметрично и вращался вместе с диском. Масляный шар диаметром в 6 см, который в спокойном состоянии представлялся несколько растянутым вдоль оси, при вращении тотчас же сплющивался у полюсов. При скорости вращения от двух до трех оборотов в секунду шар становился около оси полым и, наконец, превращался в правильное кольцо, которое, однако же, оставалось соединенным с диском тонкой пленкой и отрывалось от него только тогда, когда вращение внезапно прекращали. Образующая поверхность кольца представлялась тогда кругом; у небесных тел, как, например, у Сатурна, сама планета могла вызвать сплюснутость кольца; и здесь оно представлялось сплюснут-

ления вращательного движения, что отдельные этапы его вывода можно проследить глазами, — содержит общие результаты, которые легко можно применить к вышеуказанному случаю. Тем не менее, рассматриваемые явления до сих пор все-таки остаются для нас мало наглядными, и потому мне кажется счастливым совпадением, что г. Фессель... со своей стороны устроил прибор, который, представляя наглядно эти явления, поражает всякого наблюдателя и способен на мгновение изумить даже посвященного" (стр. 174).

¹ „Pogg. Ann.“, XC, стр. 548.

² „Mém. de l'Acad. Brux.“, XVI, 1843 г.; „Pogg. Ann.“, дополнительный том II, стр. 249. Joseph Antoine Ferdinand Plateau (1801—1883) изучал по желанию своего опекуна сначала право, но затем занялся математикой, физикой и химией в Люттихе. В 1827 г. он стал преподавателем математики в Люттихе, в 1830 г.— в Брюсселе, с 1835 г. — профессор экспериментальной физики в Гентском университете. В 1843 г. он совершенно ослеп, но, несмотря на это, продолжал при содействии преданных учеников и друзей свои экспериментальные открытия с почти неослабевающим успехом („Annuaire de l'Acad. Royale de Belgique“, стр. 389, 1885).

³ Относительно повода к этим исследованиям биограф Плато говорит в „Annuaire de l'Acad. Roy. de Belgique“ 1885, стр. 422: „Его препаратор налил немного масла в сосуд, содержащий смесь воды с алкоголем; профессор с удивлением увидел, что маленькие массы масла приняли сферическую форму; он тотчас же применил свое правило „вовремя удивляться“. Наблюденное явление послужило затем для него предметом долгих размышлений, и он задумал систему опытов, которым предстояло блестящее будущее“.

112 ФИГУРЫ РАВНОВЕСИЯ ЖИДКИХ МАСС

ным, пока пленка не была разорвана. Плато ставит перед математиками вопрос, могут ли еще какие-нибудь другие фигуры вращающихся жидкостей, кроме эллипсоида, находиться в равновесии; для кольца он полагал бы возможным дать утвердительный ответ. Когда Плато для образования кольца применял большой диск, около 5 см в диаметре, и продолжал движение в момент наибольшего образования кольца, то «при остановке движения пленка, как и прежде, разрывалась, но кольцо не сливалось тогда в сфероид вращения, а распалось на отдельные массы, которые принимали форму шаров и продолжали вращение, но в то же время получали свое собственное вращение в направлении движения и часто имели около себя еще маленькие масляные шарики, наподобие лун. Удавалось даже получать планетоподобные формы с кольцом; для этого приходилось вращать диск диаметром в 2 см со скоростью 15 оборотов в секунду.

Указанное здесь отношение опытов Плато к теории образования *мировой системы* сам Плато в своих последующих работах назвал *случайным*¹ и в дальнейшем использовал открытый им метод — освобождения вещества от действия тяжести — только для изучения *молекулярных* сил и явлений *капиллярности*. Поэтому он изменил заглавие своих статей, и следующие серии своих работ на эту тему он озаглавил следующим образом: «*Экспериментальные и теоретические исследования о фигурах равновесия жидкой массы, лишенной тяжести*». В первой из этих статей², следовательно, во второй серии всего ряда, он дает общую формулу для поверхностей жидких масс, не имеющих тяжести $1/R + 1/R_1 = C$, где R и R_1 обозначают наименьший и наибольший радиусы кривизны в одной и той же точке поверхностей, а C — постоянную, которая может быть положительной или отрицательной или также может равняться нулю. С помощью того же своего метода ему удалось получить из масляной массы, лишенной тяжести в алкоголе, различного вида фигуры, например цилиндр, для чего он приводил в соприкосновение с маслом два металлических диска одинакового диаметра и затем удалял эти диски друг от друга. Равновесие этого цилиндра оставалось устойчивым, пока высота его не

¹ В следующей своей статье Плато говорит об упомянутой выше первой статье: „Она является почти исключительно экспериментальной, и ее следует рассматривать под этим углом зрения; в то время, когда я ее писал, я еще недостаточно изучил теорию капиллярного действия, и она в этом отношении содержала несколько небольших погрешностей; кроме того, я увлекся аналогиями с астрономическими явлениями, которые могут иметь только случайную связь с результатами моих опытов" („Ann. de chim. et de phys." (3), XXX, стр. 204).

² „Mém. de l'Acad. Brux.", XXIII. 1819; извлечение в „Ann. d. chim. et de phys." (3), XXX, стр. 203. Араго предпосылает в „Comptes rendus", XXIX, стр. 802 этим статьям следующие слова: „Бельгийское правительство оказало науке существенную услугу и оказало самому себе честь, сохранив за несчастным (уже несколько лет назад ослепшим) физиком полное содержание, которое он получал в качестве профессора Гентского университета. Сам Плато при содействии нескольких преданных друзей, снабдивших его своими глазами и производивших опыты под его непосредственным руководством, продолжал свои интересные исследования. Приведенный ниже мемуар служит тому доказательством".

достигала величины утроенного диаметра; при большем удлинении цилиндров они претерпевали, в большинстве случаев в двух местах, сужения, между которыми образовывалось утолщение; под конец цилиндры распадались на отдельные массы, принимавшие форму шара.

В этой же статье Плато приписал наблюдавшиеся еще Саваром интересные формы *водяных струй*, вытекающих из круглого отверстия, действию сцепления, которому не противодействует тяжесть. Эту тему он продолжал разрабатывать в следующей серии своих сочинений¹. 1856 г. и даже в седьмой серии 1867 г. он снова вернулся к ней².

Однако новые пути к исследованию капиллярных сил, которые полностью или частично освобождены от противодействия тяжести, Плато открыл в пятой серии своих исследований 1861 г.³. Он заметил, что масляные пленки в алкоголе принимают на применявшихся в предыдущих опытах проволочных рамках такие же формы, как и мыльные пленки в воздухе; он решил, что и у последних, благодаря их тонкости, тяжесть может иметь только ничтожное влияние по сравнению со сцеплением, и потому занялся *специальным изучением формы подобных мыльных пленок*. Одну весовую часть марсельского мыла растворили в 40 частях дистиллированной воды, по охлаждении эту жидкость профильтровали и к ней прибавили $\frac{2}{3}$ объема глицерина. Спустя некоторое время получается осадок, который удаляется посредством сифона. Полный шар из этой жидкости в 100 мм диаметром держался целых три часа, а жидкость оставалась пригодной в течение целого года. Погружая различные проволочные фигуры в эту жидкость и наблюдая получающиеся при этом жидкие пленки, Плато установил следующие законы: 1) в одном и том же ребре *жидкости* никогда не сходятся более трех пленок и эти последние образуют между собой равные углы; 2) если внутри системы жидких пленок несколько жидких ребер встречаются в *одной и той же точке*, то их всегда бывает четыре, и они образуют между собой равные углы; 3) для каждой точки жидкой пленки, которая не принадлежит к замкнутой поверхности, образовавшейся на жидкости, сумма обратных величин радиусов кривизны равна нулю; если же точка принадлежит к замкнутой поверхности, то эта сумма имеет постоянную величину. Для давления p , которое производит шарообразный мыльный пузырь диаметром d на находящуюся внутри его массу воздуха, получилось на основании теоретических рассуждений выражение $p=2hp/d$, где h обозначает капиллярную высоту поднятия жидкости в волосной трубке 1 мм в диаметре, а ρ — плотность жидкости. Плато считал возможным допустить, что толщина жидкой пленки, образующей мыльный пузырь, вообще больше двойного радиуса сферы действия молекулярного притяжения, но в момент разрыва пузыря она должна быть почти равна

¹ „Mem. de l'Acad. Brux.", XXX, 1856. Четвертая серия („Mém. de l'Acad. Brux.", XXXI; „Pogg. Ann.", CVII, стр. 394, 1860) содержит исследования „О других фигурах равновесия при вращении, отличных от шара и цилиндра".

² „Mém. de l'Acad. Brux.", XXXVI; „Pogg. Ann.", CXXX, стр. 264, 1867.

³ „Mém. de l'Acad. Brux.", XXXIII; „Pogg. Ann.", CXIV, стр. 597.

114 КАПИЛЛЯРНОСТЬ И ЕЕ ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

этому двойному радиусу. На основании цветов тонких пленок их толщина определилась в $\frac{1}{8811}$ мм; следовательно, *радиус сфер молекулярного действия* должен был бы составить $\frac{1}{17622}$ мм или круглым числом $\frac{1}{17000}$ мм¹.

В шестой² и восьмой³ сериях Плато обстоятельно занялся исследованием причин, которые могут обусловить как *возникновение*, так и *сохранение жидких пластинок*. При этом он пришел к убеждению, что эти причины следует искать не только в вязкости жидкостей, но еще больше в их *поверхностном натяжении*, так как у жидкостей с приблизительно равной вязкостью способность образования пластинок может быть совершенно различной. Это поверхностное натяжение, которое действует против вязкости и всегда стремится разорвать пластинки, зависит от природы жидкости и изменяется в обратном отношении к температуре; но, с другой стороны, оно не зависит от кривизны поверхности и от толщины пластинки, по крайней мере, до тех пор, пока эта толщина не становится меньше двойного радиуса молекулярного притяжения. С точки зрения способности образовывать пластинки следует различать *три рода жидкости*. *Первый из них* дает при взбалтывании немного пены; его пластинки недолговечны и не дают никаких или же мало цветов; им следует приписать большое поверхностное натяжение и большую внешнюю, чем внутреннюю, вязкость. К этой группе жидкостей принадлежат вода, глицерин, концентрированная серная кислота и т. д. *Второй род жидкостей* образует быстро появляющиеся, но и быстро исчезающие пузыри с сильным окрашиванием, он отличается от первого незначительным капиллярным поверхностным натяжением и большею внутреннею, чем внешнею, вязкостью. Сюда принадлежат жирные масла, алкоголь, бензин, сернистый углерод и др. Наконец, *третий род жидкостей* образует при взбалтывании долго сохраняющуюся пену, легко может выдвигаться в пузыри и его пластинки сохраняются в продолжение часов и даже дней; они обладают малым поверхностным натяжением и опять-таки большею внешнею, чем внутреннею, вязкостью. Примерами таких жидкостей могут служить растворы мыла, яичный белок, расплавленное стекло и т. д. Вопросом о различной устойчивости жидких пластинок Плато занимался и далее, в последних сериях своих исследований⁴, к которым он в заключение приложил очень богатый обзор литературы обо всех прежних работах, посвященных той же теме.

Впрочем, в специальной *теории капиллярности физики* — экспериментаторы давно уже усвоили себе взгляд Пуассона на действие поверхностного натяжения. Г. Гаген⁵ в обширной работе 1845 г. экспериментально вновь подтвердил выводы Пуассона настолько точно, насколько этого можно было ожидать; проведенные им с большим

¹ „Pogg. Ann.“, CXIV, стр. 608.

² „Mém. de l'Acad. Brux.“, XXXIII; „Pogg. Ann.“, CXXX, стр. 149, 1867.

³ „Mém. de l'Acad. Brux.“, XXXVII; „Pogg. Ann.“, CXLI, стр. 44, 1870.

⁴ 9, 10 и 11 серии; „Mém. d. l'Acad. Brux.“, XXXVII, 1868.

⁵ „Pogg. Ann.“, LXVII, стр. 1 и 152. Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen (1797—1884), сначала — гидротехник, под конец жизни — заведующий строительными работами в Берлине.

КАПИЛЛЯРНОСТЬ И ЕЕ ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ 115

усердием измерения капиллярных постоянных различных жидкостей при различных условиях тоже были основаны целиком на теории Пуассона. Только в одном пункте представился случай не только превзойти прежних теоретиков, но и исправить их. Если капиллярные явления происходят вследствие молекулярных сил, сцепления, поверхностного натяжения и прилипания, то они должны изменяться под действием всех тех физических сил, которые оказывают влияние на молекулярные силы; следовательно, действие этих сил, каковыми являются, прежде всего, *теплота*, а может быть, и *электричество*, должно быть тщательно изучено. По Вольфу¹ Лаланд впервые в 1768 г. указал, что *капиллярность зависит от температуры* и что теплая вода в капиллярных трубках поднимается на меньшую высоту, чем холодная. Лаплас и Пуассон оба затем согласно вывели, что у *смачивающих* жидкостей свободная поверхность остается при всех температурах всегда одной и той же и что, следовательно, *высоты поднятия при различных температурах должны быть пропорциональны плотности жидкости*; для несмачивающих жидкостей они не могли установить никакого закона, так как у них форма поверхности изменяется с температурой. Напротив, Бруннер² в 1848 г. на ряде очень точных и многочисленных опытов с водою, безводным эфиром и оливковым маслом показал, что эти теоретические результаты совершенно неверны и что с повышением температуры высоты поднятия убывают гораздо быстрее, чем плотности жидкостей. Согласно его измерениям высоты поднятия в трубках в 1 мм составляют: для воды 15,33215 мм—0,0286396 t, для эфира 5,3536 мм—0,028012 t и для оливкового масла 7,4610 мм—0,010486 t; с этими формулами физики, вообще говоря, согласились. Бейс-Баллот³ отметил только, что он уже в 1844 г. в своей диссертации на получение ученой степени опроверг данные Лапласа-Пуассона и из опытов Франкенгейма вывел для величины a^2 , пропорциональной высоте поднятия, у воды формулу 15,3 мм—0,028 t Гольтцман⁴ указал, что его формула 607—1,1394 t, которую он установил в 1845 г. для сцепления воды, переходит почти точно в бруннеровскую при умножении ее на 15,33215/607. Франкенгейм⁵ даже принял, что высоты поднятия зависят от *квадрата* температуры, и вычислил их по формуле вида $a+bt+ct^2$. Он также сумел доказать, что *понижение уровня ртути*, как того и следует ожидать, сильнее возрастает с температурой, чем уменьшается ее плотность. Наконец, Вольф⁶ экспериментально показал, что, как это неизбежно следует из эмпирических формул, *при достаточно высоких температурах поднятие воды в капиллярных трубках действительно может перейти в депрессию (снижение)*.

¹ „Ann. de chim. et de phys.“ (3), XLIV, стр. 230; „Pogg. Ann“., CI, стр. 550, 1857

² „Pogg. Ann.“, LXX, стр. 481. С. Brunner (родился в 1823 г., отец его — С. Е. Brunner) — профессор физики в Берне.

³ „Pogg. Ann.“, LXXI, стр. 177.

⁴ Там же, стр. 463.

⁵ Там же, LXXII, стр. 177 и LXXV, стр. 229.

⁶ „Comptes rendus“, XLII, стр. 968, 1855.

116 ЭНДОСМОТИЧЕСКИЙ ЭКВИВАЛЕНТ

Однако действия *электрических сил* на капиллярные явления не удалось констатировать. Дрэпер¹ в 1846 г. высказал мысль о существовании связи между этими явлениями; но Бруннер² не мог констатировать какого-либо заметного изменения высоты поднятия ни при размыкании, ни при замыкании тока по спирали, навитой вокруг капиллярной трубки.

Много также было произведено исследований и много было дискуссий по вопросу о роде и *причине связи между капиллярными и диосмотическими явлениями*, тем более что для последних было еще труднее добиться надежных постоянных, чем для первых. Некоторого успеха достиг в этом отношении Жолли в 1849 г.³ Он помещал в трубку, нижний конец которой был затянут животным пузырем, отвешенное количество исследуемой жидкости, опускал эту трубку нижним концом в большой сосуд с водой, которая от времени до времени заменялась чистой водой, и взвешивал жидкость в трубке только тогда, когда ее количество становилось постоянным, т. е. когда в трубке находилась уже только чистая вода. Из этих опытов он вывел закон, что на единицу веса растворенного вещества при прочих равных условиях вступает всегда одно и то же количество воды; это количество он назвал *эндосмотическим эквивалентом* рассматриваемого вещества. Применяя один и тот же кусок свиного пузыря, Жолли нашел следующие величины эндосмотических эквивалентов.

Для сернокислого калия . . . 12,76

Для сернокислой меди . . . 9,564

Для сернокислого магния . . 11,80

Для серной кислоты 0,349

Для сернокислого натрия . . 11,03

Для едкой калийной щелочи 231,40

Правда, при употреблении различных пузырей или даже различных кусков одного и того же пузыря получались некоторые расхождения, но они не были настолько велики, чтобы нельзя было говорить о средних значениях эквивалента. В остальном Жолли подтвердил закон Дютроше, что количество веществ, переходящих в *определенные равные промежутки времени*, пропорциональны концентрациям соляных растворов. Между тем очень скоро были высказаны сильные сомнения в постоянстве так называемого эндосмотического эквивалента. Карл Людвиг⁴ прямо заявил, что величина эквивалента колеблется и, во всяком случае, изменяется с концентрацией растворов, причем даже и характер зависимости эквивалента от концентрации неодинаков у всех жидкостей. А. Фик⁵ даже утверждал, что можно получить различные величины эндосмотического эквивалента, направляя в одном случае ток воды сверху вниз, а в другом — снизу вверх. Хотя Жолли и мог с большой долей вероятности указать в ответ на эти возражения, что полученные отклонения большей частью могут быть приписаны раз-

¹ „Pogg. Ann.“, LXVII, стр. 84.

² Там же, LXX, стр. 481 и LXXIX, стр. 173.

³ Там же, LXXVIII, стр. 261. Phillipp Gustav v. Jolly (1809—1884) — профессор физики Мюнхенского университета.

⁴ „Pogg. Ann.“, LXXVIII, стр. 307.

⁵ Там же, XCII, стр. 333.

ОСМОТИЧЕСКАЯ СИЛА 117

личию применявшихся перепонки, однако, отмеченные, равно как и некоторые другие, обстоятельства создали довольно тесные пределы для применимости найденных Жолли законов, — тем *более* что влияние свойства перепонки на эндосмос совершенно не поддавалось учету.

Невозможность численно учесть влияние перепонки проявилась также и в опытах Грэхема ¹ над диосмосом жидкостей. Последний нашел, что вода вступает в весьма оживленный диосмотический обмен с множеством соляных растворов, имея даже почти одинаковые капиллярные силы с ними ²; на этом основании он пришел к выводу, что точка зрения Пуассона, согласно которой капиллярность является единственной силой, вызывающей диосмос, должна быть признана определенно неверной. По мнению Грэхема при исследовании эндосмотических явлений следует гораздо больше обращать внимание на *химическое различие* между подвергающимися осмосу жидкостями, равно как между жидкостью и перепонкой, а также на различие *электрических состояний* этих веществ, чем на постоянные капиллярности. Какое участие принимает в этом процессе перепонка и вызывается ли действие силы чисто химическим или скорее электрическим различием жидкостей, — этот вопрос Грэхем оставил невыясненным и поэтому дал действующей причине ничего не говорящее название *осмотической силы*. Одно только он признал возможным считать установленным, что *осмотический ток* (движение воды) *всегда идет от кислотных жидкостей к основным, или с положительной стороны перепонки на отрицательную* ³. Одного простого химического различия *между самими жидкостями*, однако, не было достаточно, и там, где к явлению, кроме того, не присоединялось и *химическое действие между жидкостями и перепонкой*, оно теряло свой подлинно осмотический характер и принимало скорее характер чистой диффузии. Либиг ⁴ пытался выяснить влияние перепонки при диосмосе, определяя те количества различных жидкостей, которые может впитать какой-нибудь определенный кусок животной перепонки; для такой постоянной величины он предложил даже особое название коэффициента набухания (*Quellungsmenge*). Хотя, таким образом, и было дано новое средство для дальнейшего изучения влияния перепонки, однако введение нового понятия не помогло более детально выяснению истинной причины данного явления; К тому же и здесь дальнейшие изыскания натолкнулись на всегда различные действия отдельных кусков материально совершенно одинаковых перепонки. Многие физики из теоретических соображений стали

¹ „On osmotic force“, „Phil. Trans.“, стр. 177, 1854. Thomas Graham (1805—1869)— профессор химии сначала в Глазго, а потом в Лондоне; с 1855 г. директор монетного двора в Лондоне после Джона Гершеля.

² Так, высоты поднятия в одной и той же трубке достигали для воды 17,75 мм, для 10%-ного раствора хлорноватокислого калия — 17,55 мм, а для 10%-ного раствора хлорноватокислого натрия — 16,85 мм, для 1%-ного раствора щавелевой кислоты — 17,35 мм, для 1%-ного раствора серной кислоты — 16,35 мм, для 1%-ного раствора соляной кислоты—17,50 мм.

³ Лермит показал („Comptes rendus“, XXXIX, стр. 1177; „Ann. de chim. et de phys.“ (3), XLIII, стр. 420), что и этот закон не всегда имеет силу.

⁴ „Liebig's Ann. d. Chem.“, CXXI, стр. 78, 1862.

118 ДИФФУЗИЯ ЖИДКОСТЕЙ

даже склоняться к тому мнению, что различие в действии перепонки или величинах коэффициента набухания зависит только от различной их *пористости*, и, таким образом, были готовы свести диосмотические явления к явлениям капиллярности и диффузии; но по существу это было лишь сведением одного неизвестного к другому, хотя самая мысль об установлении связи между этими явлениями и представляется ценной.

Какие трудности представляло для физиков даже объяснение *свободной диффузии жидкостей*, об этом свидетельствовали новые, поразительные наблюдения Грэхема ¹. Помещая в большой сосуд с водою открытый стакан с исследуемыми с точки зрения диффузии растворами, он нашел, что даже одинаково тяжелые растворы различных солей диффундируют при равных условиях с очень разнообразными скоростями. Так, например, для углекислых калия и натрия количества, перешедшие в воду в одинаковое время и при равных условиях, относились между собою, как 64:36; для других солей это различие было еще больше. При этом происходили даже слабые химические разложения; из кислого сернистого калия диффундировала не одна только соль, но также и некоторое количество свободной серной кислоты; квасцы частично разлагались при диффузии на обе составляющие их соли. Позднее ² Грэхем, наливая с помощью пипетки некоторые растворы на дно наполненного водою сосуда и от времени до времени исследуя небольшие количества верхних слоев жидкости с точки зрения содержания в них диффундировавшего вещества, открыл, что известные органические, некристаллические вещества отличаются крайне незначительною скоростью диффузии. Та же самая концентрация верхних слоев воды, которая для соляной кислоты получалась спустя одни сутки, для поваренной соли наступала через 2,33, для сахара через 7, для сернокислого магния через 7, для яичного белка через 49 и для леденца только спустя 98 дней. В соответствии с этим Грэхем разделил все диффундирующие жидкости на два класса: *на кристаллоиды и коллоиды*. Смеси из обоих этих классов жидкостей, вследствие различия скорости их диффузии, разделяются уже при свободной диффузии, но особенно легко они отделяются друг от друга при диффузии через коллоидную перепонку. *Поэтому Грэхем особенно рекомендовал диализ для очищения коллоидов.*

В это же время Шумахер ³ снова сделал довольно удачную попытку объяснить *диффузию*, а затем и *диосмос* жидкостей молекулярными силами. По Шумахеру все жидкости, если они проявляют друг к другу некоторую степень химического притяжения, стремятся полностью смешаться. Положим, что в некоторой жидкости находятся молекулы какой-нибудь другой жидкости или же твердого тела (растворенной соли); молекулы эти будут испытывать со стороны жидкости притяжения, которые будут неодинаковы по различным направлениям до

¹ „On the diffusion of liquids". „Phil. Trans.", стр. 1 и 895, 1850 и стр. 483, 1851.

² „Liquid diffusion applied to analysis", „Phil. Trans.", стр. 183, 1861; извлечение (из „Proc. of the Royal Soc.") помещено в „Pogg. Ann.", CXIV, стр. 187.

³ „Pogg. Ann.", CX, стр. 337, 1860.

ДИФФУЗИЯ ГАЗОВ 119

тех пор, пока вследствие полного смешения не наступит равномерное распределение этих молекул и вместе с тем известное положение равновесия. Если жидкости разделены пористой стенкой, то смешение тоже будет происходить, но только в этом случае скорость и характер его изменятся вследствие присутствия стенки. Если стенка проявляет по отношению к одной из жидкостей большую силу притяжения, то скорость этой жидкости увеличивается и количество ее, прошедшее за определенное время через стенку, будет большим, чем у другой жидкости. Вполне естественно поэтому, что все обстоятельства, оказывающие влияние на молекулярное притяжение, изменяют также и явления осмоса. Однако в такой же мере было естественно, что вследствие невыясненности молекулярных сил, особенно же действующих между твердыми телами и жидкостями, этой теории не было придано большого значения. Диффузия и диосмос жидкостей представляют собою настолько сложные явления, что без предварительного изучения молекулярных сил на более простых явлениях едва ли можно будет выяснить происходящую при них игру сил.

Лучше обстояло дело с *диффузией газов*, где мало-помалу научились обходиться без молекулярных сил. Согласно новейшей теории газов, которая в это время постепенно развивалась, диффузия двух различных газов, находящихся в соприкосновении, представлялась неизбежным явлением, относительная медленность которого выставлялась даже в качестве возражения против новой теории. Однако при *диосмосе* газов (диффузии через пористые стенки) встретились те же трудности, как и в жидкостях. Именно, Грэхем сначала полагал, что его закон свободной диффузии применим и к диосмосу газов, — что последний происходит совершенно так же, как истечение газов через отверстие в тонкой стенке; однако позднее он нашел ¹, что *даже истечение газов через капиллярные трубки не следует закону свободного истечения*; что скорости истечения газов уже не обратно пропорциональны корням квадратным из плотностей, но *зависят также от особой природы газон и изменяются вместе с нею*. Жамен ², который в 1856 г. вновь наблюдал прохождение газов через стенки глиняных сосудов, пришел к заключению, что это явление аналогично осмосу жидкостей и, с одной стороны, зависит от способности просачивания обеих упругих жидкостей, а с другой, — от силы, «*которую может быть либо химическое сродство, либо какое-нибудь электрическое действие, либо, наконец, просто молекулярное притяжение*». Наиболее решительно высказался против применения грэхемовского закона диффузии к диосмосу газов Бунзен в своей известной работе «*Gasometrische Methoden*», Braunschweig 1857 г. («Газометрические методы»). Он, напротив, отстаивал то мнение, что *законы диффузии газов через пористые стенки аналогичны законам прохождения газов через капиллярные трубки и должны зависеть как от природы самих газов, так и от специфических свойств перегородки*. Все эти новые идеи о движении жидкостей привели тогда, с одной стороны, к установлению нового понятия о вну-

¹ „On the motion of gases“, „Phil. Trans.“, стр. 349, 1849.

² „Comptes rendus“, XLIII стр. 234; „Pogg. Ann.“, XCIX, стр. 327.

120 ПРИЛИПАНИЕ ГАЗОВ К ТВЕРДЫМ ТЕЛАМ

трением трении жидкостей и газов, которое в новейшее время подверглось усердному изучению, а с другой стороны, — они побудили к более точному исследованию явления прилипания газов и жидкостей к твердым телам.

К последнего рода исследованиям более интенсивно и с более общей точки зрения приступили только в последующий период; однако уже в рассматриваемый период одно странное явление привело к наблюдению значительной силы и прочности этого слипания твердых тел с газами. В 1842 г. Л. Мозер¹ в статье «Über den Process des Sehens und die Wirkungen des Lichtes auf alle Körper» («О процессе зрения и о действии света на все тела») обратил внимание на «давно уже известный факт, что если с помощью некоторых веществ написать что-либо на хорошо полированной стеклянной доске и затем написанное стереть, то его можно вновь сделать видимым при помощи водяного пара, например, если подышать на пластинку; это же явление имеет место и в том случае, если на стеклянную пластинку положить монету, подышать на нее и затем снять». Так как подобное явление получается и в том случае, когда монету не кладут прямо на пластинку, а держат только на небольшом расстоянии от нее, то Мозер полагал, что такое изменение прилипания водяного пара к пластинке не следует приписывать непосредственному соприкосновению тел. Больше того, он поставил это явление в прямую связь с другим, которое возбудило столь большой интерес в только что открытой *дагерротипии*, а именно, что свет способен на поверхности полированной серебряной пластинки вызывать изменения, которые, оставаясь незаметными непосредственно для глаза, обнаруживаются только по неравномерному осадку на пластинке ртутных паров². Для объяснения обоих этих явлений он допустил, что *свет, подобно теплоте, может находиться в телах в скрытом³ состоянии и что этот-то свет и производит изменения в прилипании газов и паров к твердым телам.* Но так как все же невидимый свет тел действует на поставленные на его пути металлические пластинки совершенно иначе, чем прямой солнечный свет, то Мозер счел необходимым прибавить к сказанному довольно невероятное предположение, что *невидимые световые лучи, вызываемые этим скрытым источником света, еще более преломляемы, чем даже*

¹ „Pogg. Ann.“, LVI, стр. 177. Ludwig Ferdinand Moser (1805—1880) — профессор физики в Кенигсберге.

² Мозер, по-видимому, впервые пришел к своим опытам с „потными“ изображениями при попытках объяснить последние явления.

³ „Pogg. Ann.“, LVII, стр. 1: „Über das Latentwerden des Lichtes“. В своей статье в следующем томе „Pogg. Ann.“ (стр. 108) Мозер приводит объяснение странных изображений, которые наблюдались на старых стеклах. Тот факт, — говорит он, — что на стеклах, долгие годы покрывавших медные гравюры, однако без прикосновения к ним, наблюдаются беловатые изображения этих гравюр, является следствием продолжительного действия света. После этого проф. Мейстер сообщил („Pogg. Ann“, LIX, стр. 638), что в Фрейзинге на оконных стеклах, которые стекольщик вставил бедным людям и которые были вырезаны из старых давно купленных стекол, вдруг выступили беловатые изображения святых. *Мейстер полагает, что эта, равно как и другие, принимаемые за чудо изображения на стекле следует объяснить совершенно так же, как мозеровские световые фигуры.*

РАБОТЫ МОЗЕРА И „ПОТНЫЕ" ИЗОБРАЖЕНИЯ 121

*ультрафиолетовые лучи солнечного света и что в последнем подобных лучей совершенно не имеется*¹.

Опыты Мозера вызвали огромный интерес; многие физики полагали, что его выводы «*обещают приобрести столь же большое значение, как некогда открытие Вольтой*² *электрического столба*». Однако вскоре против его теории невидимых лучей были высказаны очень сильные и веские возражения. Роберт Гонт приписал «потные» изображения не свету, приходящему в скрытое состояние, а *скрытой теплоте* и даже противопоставил фотографии *термографию*³. Подобным же путем пошел Кнопп, горячо возражавший в ряде статей против мозеровского «скрытого» света⁴. Но Физо еще в 1843 г.⁵ утверждал, что для получения «потных» изображений не нужно ни световых, ни тепловых лучей и что они происходят вследствие изменения поверхности пластинок или, точнее, *вследствие изменения всегда прилипающего к ним слоя воздуха*. Эрвин Вейдель путем убедительных опытов добился того, что эта точка зрения стала общепризнанной. Он по желанию то снимал с пластинки слой газа, полируя ее прокаленным древесным углем, то, наоборот, наводил слой газа, натирая ее порошком, который впитывал в себя много газа. Таким образом он показал, что «потные» фигуры не появляются в том случае, когда оба соприкасающихся тела свободны от всяких прилипших слоев газа, а равно и в том случае, когда оба они покрыты совершенно одинаковыми слоями, и что происхождение этих изображений следует объяснить только различием газовых слоев, покрывающих тела, с которых снимается изображение, и тела, которые его воспринимают, а также изменениями, происходящими в этих слоях⁶. Эта теория могла быть затем применена и для объяснения *электрических изображений*, которыми в это время очень много занимался Карстен⁷. Она же, пожалуй, могла дать удовлетворительное объяснение и для некоторых интересных явлений, замеченных Берцелиусом и наблюдаемых Уэллером при многих опытах⁸. А именно, если на стеклянную пластинку налить насыщенный раствор какой-либо соли, например фосфорнокислой аммиак-магнезии, и провести пером несколько линий по пластинке, то при выкристал-

¹ „Pogg. Ann.", LVI, стр. 569: „Über das unsichtbare Licht".

² „Pogg. Ann.", LVIII, стр. 334.

³ „Philosophical Magazine" (3), XXI, стр. 462 и „Pogg. Ann.", LVIII, стр. 326. „Über Thermographie oder die Kunst, Zeichnungen und Druckschrift von Papier auf Metall mittelst Wärme zu übertragen".

⁴ „Pogg. Ann.", LVIII, стр. 320 и 563; LX, стр. 18.

⁵ „Comptes rendus", XV, стр. 896 и XVI, стр. 397; „Pogg. Ann." LVIII, стр. 592 и 594.

⁶ „Pogg. Ann.", LIX, стр. 225. Мозер и после работ Физо с большим мужеством оспаривал это механическое объяснение потных изображений, которое, по-видимому, совершенно обесцвечивало его открытие; однако после появления статьи Веделя он, как видно, прекратил эту борьбу, признав ее бесполезной (см. „Pogg. Ann.", LX, стр. 40 и 48).

⁷ „Pogg. Ann.", LVII, стр. 492; LVIII, стр. 115; LX, стр. 1. Еще в последней своей статье Карстен склоняется к мнению, что все упомянутые выше изображения, включая и мозеровские, следует свести к действию электрических сил. Gust. Karsten (родился в 1820 г.) — профессор физики в Киле.

⁸ „Philosophical Magazine", XXVIII, стр. 94, 1816.

122 ПРИЛИПАНИЕ И ПОГЛОЩЕНИЕ ГАЗОВ, ЖИДКОСТЕЙ И ТВЕРДЫХ ТЕЛ

лизывании эти линии становятся заметными по накоплению на них маленьких кристаллов. При всем том, однако, *изменение йодированной серебряной пластинки* в камере-обскуре все еще оставалось необъясненным и не было установлено, в какой мере оно зависит от *механических изменений поверхности* и в какой — от химических процессов.

Если твердые тела и жидкости сгущают газы на своей поверхности, то следует допустить, что они их также и поглощают и в зависимости от своей скважности удерживают их более или менее сильно. Фарадей, как уже было указано выше, воспользовался для объяснения каталитического действия свойством губчатой платины поглощать газы. Жамен и Бертран ¹ опубликовали в 1853 г. обширный ряд опытов над *поглощением различных газов* пористыми телами или порошками, как, например, стеклянным порошком, песком, металлическими окисями, металлическими опилками и пр.; из этих опытов как будто вытекало, что в действительности *поглощение происходит только с поверхностями как внешних, так и внутренних*. К подобным же выводам пришел и Магнус ². Но так как величину поверхности в пористых телах определить невозможно, то куда и здесь также еще не пришли к каким-либо надежным выводам. Еще сложнее оказалось это дело у *жидкостей*. Дальтон высказал мнение, что жидкости поглощают газы совершенно так же, как пористые тела. Но Грэхем ³ уже в 1826 г. указал, что *поглощение газов жидкостями совершенно аналогично растворению солей в воде*. Позднее оказалось, что здесь *имеют место оба рода поглощения* и что действия отдельных причин трудно или почти невозможно отделить друг от друга. Многочисленные и точные опыты, которые Бунзен опубликовал в своем упомянутом выше сочинении «Gasometrische Methoden» ⁴, показали, что газы разделяются на *две*, правда, переходнике друг в друга группы, из которых одна проявляет слабое, другая же гораздо более сильное поглощение, и что вторую группу можно считать обладающей свойством растворяться в воде. Но представляет ли собою это растворение процесс *чисто физический* или *чисто химический*, или, наконец, *смешанный* — это удалось здесь столь же мало выяснить, как и для растворения солей ⁵. Что касается отношения между поглощением газа и давлением, то Бунзен подтвердил закон Дальтона и Генри ⁶, согласно которому количества газа, поглощаемого жидкостями при различных давлениях, но при прочих равных условиях, пропорциональны давлению, если только газы и жидкости друг на друга химически не действуют. Зависимость же поглощения от *температуры* оказалась, напротив, очень сложной и только приблизительно могла быть представлена выражением вида $a - bt + ct^2$. Выде-

¹ „Comptes rendus“, XXXVI, стр. 904,

² „Pogg. Ann.“, LXXXIX, стр. 604, 1853.

³ „Ann. of Phil. N. S.“, XII, 1826.

⁴ Так же в „Liebig's Ann.“, XCIII, стр. I, 1855.

⁵ Магнус в упомянутой уже статье („Pogg. Ann.“, LXXXIX, стр. 610) говорит: „Отсюда следует, что поглощение, по крайней мере отчасти, происходит вследствие притяжения между частицами твердых тел или жидкостей и частицами газов; оно аналогично химическому притяжению, которое различно для различных веществ“.

⁶ „Phil. Trans.“. 1803; „Gilbert's Ann.“, XX, стр. 147.

ПРИЛИПАНИЕ И ПОГЛОЩЕНИЕ ГАЗОВ, ЖИДКОСТЕЙ И ТВЕРДЫХ ТЕЛ 123

ление газа из жидкости может быть вызвано уменьшением давления и введением порошкообразных твердых тел; однако же полный эффект достигается, как и в случае прилипания слоев газа к твердым телам, только путем *значительного нагревания* или *кипячения жидкостей*.

Разнообразные исследования явлений прилипания между твердыми, жидкими и газообразными телами заставили теперь обратить большее внимание и на явления *сцепления между различными жидкостями*. Уже много раз, при сообщении об успокаивающем действии масла морские волны, указывали на странное явление *растекания масла по поверхности воды*; однако этому свойству масла больше удивлялись, чем пытались объяснить¹. Исследования А. Фузиньери², Франкенгейма³ и других показали, что как *растекание* одной жидкости по другой, так и, наоборот, *образование нерастекающихся капель* вовсе не составляет *какого-нибудь особого свойства*, но присуще многим жидкостям и поэтому должно быть отнесено за счет общих свойств, или молекулярных сил жидкостей. Пауль дю-Буа-Реймон⁴ в выдающейся работе 1854 г. исследовал, главным образом, условия, при которых наливание одной жидкости на другую приводит либо к *образованию нерастекающихся капель*, либо к *растеканию второй жидкости по первой*, либо, наконец, к *полному смешению обеих жидкостей*. При растекании жидкости он открыл новые, до тех пор еще не наблюдаемые явления, которые указывали на взаимные движения обеих рассматриваемых жидкостей. Когда в стакан, частично заполненный водою, он наливал слой масла толщиной в 1 мм и на него выливал каплю алкоголя или эфира, то последняя быстро растекалась по масляному слою, образуя тотчас же цвета тонких пластинок; при этом одновременно в масле наверху появлялось углубление, а в воде снизу образовывалось соответствующее возвышение, так что зачастую тонкий слой масла в этом месте совер-

¹ Свидетельством того, что о растекании масла по воде было известно уже очень давно, может послужить одно место в арифметике Баскара Ахария, написанной около 1150 г. н. э. „Искра знания, когда она доходит до понимающего ума, расширяется собственной своею силою. Подобно тому как капля масла распространяется по воде или как тайна, доверенная худому человеку, или как милостыня, поданная достойному, как бы мала она ни была, — так распространяется и знание в развитом уме своею собственной внутреннею силой" (по *Arneht, Geschichte der reinen Mathematik*, Stuttgart, стр. 150. 1852). Бенджамин Франклин, который впервые вновь возбудил интерес к наблюдению этого явления, пишет в письме к доктору Броунрингу от 7 ноября 1773 г.: „При этих опытах меня особенно удивило одно обстоятельство. Это было внезапное, широкое и сильное растекание капли масла по поверхности воды, которое, насколько я знаю, до сих пор еще никем не наблюдалось... Между частицами масла как бы появляется отталкивание и настолько сильное, что оно действует так же и на другие тела, плавающие на поверхности воды, как соломинки, листочки, щенки и т. п."

² „Ann. delle scienze del Regno Lomb.-Ven", III, 1833.

³ „Die Lehre von der Cohäsion", Breslau, 1835.

⁴ „Untersuchungen über die Flüssigkeiten, über deren innere Strömungserscheinungen, über die Erscheinungen der stillstehenden Tropfens, deren Ausbreitung und Vertreibung", Berlin 1854. „Über die Erscheinungen, welche die Ausbreitung von Flüssigkeiten auf Flüssigkeiten hervorrufen", „Pogg. Ann.", CIV, стр. 193. 1858.

Paul du Bois-Reymond (1831—1889)—профессор Высшей технической школы в Шарлоттенбурге.

124 РАСТЕКАНИЕ ЖИДКОСТЕЙ И ОБРАЗОВАНИЕ КАПЕЛЬ

шенно разрывался. Дю-Буа-Реймон склонялся к мысли, что масло увлекается растекающимся спиртом и, образуя на краю водоворот, возвращается отсюда к середине, но так как эти обратные токи слабее первичных, то посередине должно происходить уменьшение количества масла; а так как струя масла вследствие трения приносит с собою обратно и некоторую часть воды, то должны образоваться скопление и поднятие воды, что в действительности и наблюдается. Относительно причины растекания самого алкоголя он не мог дать никаких надежных объяснений; он даже оставил невыясненным, происходит ли оно вследствие очень сильного отталкивания частиц жидкости, проявляющегося в тонких слоях, или только вследствие *прилипания* между алкоголем и маслом. Позднее, в 1870 г.¹, он высказался в пользу *допущения отталкивательной силы, действующей между частицами жидкостей*. Большинство физиков, однако, не согласилось признать эту силу отталкивания элементарной и настаивало на объяснении кажущегося отталкивания действием прилипания и сцепления жидкостей. Как раз перед последней работой дю-Буа-Реймона Р. Люттге² установил, что между жидкостями, которые должны растекаться одна по другой, *прилипание должно быть, во всяком случае, сильнее сцепления в той из них, которая обладает меньшим сцеплением*. Так, если наблюдение показывает, что какая-нибудь жидкость *A* растекается тонким слоем по поверхности другой жидкости *B*, то из этого можно наверняка заключить, что, наоборот, жидкость *B* не может растекаться по *A*, а должна оставаться на ней в форме капли, как это в действительности и имеет место с каплей воды на масле и обратно с масляной каплей на воде. Но такая покоящаяся на другой жидкости капля покрывается тонким слоем последней. Жидкости, у которых наблюдается явление растекания, можно расположить в ряд, в котором каждая предшествующая растекается по следующей; скорость растекания находится, по-видимому, в простом отношении к расстоянию между жидкостями в этом ряду. Условие, что прилипание жидкостей должно быть больше, чем меньшее из их сцеплений, по-видимому, удовлетворяется у большинства жидкостей и явление растекания встречается чаще, чем это вообще предполагали. Одна только *ртуть* представляет в этом отношении исключение. Ввиду значительного ее сцепления следовало бы ожидать, что все другие жидкости растекаются по ее поверхности, как это и имеет место для масла, бензина и алкоголя; однако некоторые другие жидкости, как, например, вода или мыльный раствор Плато, остаются и на поверхности ртути в виде капель. По-видимому, причиной этого является незначительное прилипание этих жидкостей к ртути. Аналогично Люттге объяснили явления образования капель и растекания жидкостей ван-дер-Менсбругге³ и Марангони⁴; при этом оба они ввели в рассмотрение понятие поверхностного натяжения. Последний указал на то, что поверхностное натяжение жидкости как при сопри-

¹ „Pogg. Ann.“, CXXXIX, стр. 262.


² „Pogg. Ann.“, CXXXVII, стр. 362, 1869.

³ „Mém. cour. et Mém. des sav. etc. de Brux.“ XXXIV, стр. 1; „Pogg. Ann.“, CXXXVIII, стр. 323. 1869.

⁴ „Pogg. Ann.“, CXLIII, стр. 337, 1871.

СЖИЖЕНИЕ ГАЗОВ 125

косновении с твердым телом, так и при соприкосновении с другою какою-либо жидкостью должно (вследствие прилипания) уменьшаться и что поэтому явления растекания жидкостей должны быть поставлены в один ряд с капиллярными явлениями. Упомянутые до сих пор действия молекулярных сил обнаружили так много различий в зависимости от агрегатного состояния рассматриваемых веществ, что их еще можно было совмещать со старыми воззрениями на *агрегатные состояния вещества как на более или менее независимые, первичные формы материи*. Однако уже и в этот период были обнаружены такие явления, которые в противоположность этому воззрению заставляли смотреть на *агрегатные состояния скорее как на случайные формы материи, зависящие от внешних обстоятельств и переходящие друг в друга*; последнее воззрение, правда, лишь в последнее время достигло большей ясности. Фарадей ¹ был, по-видимому, первым, положившим прочную основу для такого воззрения. В начале двадцатых годов нашего столетия он, по совету Дэви, нагрел в запаянной стеклянной трубке так называемый гидрат хлора, разложившийся при этом на хлор и воду. После того как разложение продолжалось некоторое время, Фарадей заметил на стенках трубки маслянистые капли ², которые при открытии трубки со взрывом исчезли. Капли эти оказались жидким хлором. Непосредственно вслед за тем подобным же образом сам Дэви ³ превратил в жидкость газообразную соляную кислоту, а Фарадею ⁴ потом удалось с помощью давления сгустить еще некоторое количество газов. Тилорье впервые в 1835

г. ⁵ приготовил в изогнутой в такой форме  и запаянной с обоих концов трубке, в одном колене которой находился углекислый кальций, а в другом — соляная кислота, большое количество *жидкой углекислоты*. Он же получил ее и в твердом состоянии и, смешав с эфиром, достиг такой степени холода, о какой раньше никогда не имели представления. Наконец, Наттерер ⁶ стал сгущать газы с помощью нагнетательного насоса в кованой железной бутылке (сделанной, по его словам, наподобие камеры духового ружья) и получил, таким образом, *закись азота*, как в жидком, так и в твердом состоянии. После того было сгущено еще большое количество газов, до тех пор считавшихся постоянными, однако отдельные газы, как воздух, азот, кислород и водород, никоим образом не поддавались сжижению. Когда Тилорье, обратясь к методу Дэви, соединил наполненную жидкою углекислотою кованую железную бутылку со стеклянной, запаянной с одного конца трубкой, наполненной

¹ „On fluid chlorine“, „Phil. Trans.“, стр. 160, 1823.

² Д-р Парис случайно зашел в лабораторию в то время, когда Фарадей был занят этой работой, и посмеялся над молодым химиком по поводу неосторожного применения нечистой посуды. На следующее утро Парис получил следующие строки: „Милостивый государь, масло, которое вы вчера заметили, было не что иное, как жидкий хлор. Преданный вам М. Фарадей“.

³ „Phil. Trans.“, стр. 164, 1823.

⁴ Там же, стр. 189.

⁵ „Ann. de chim. et de phys.“ (2), LX, стр. 427 и 432; „Pogg. Ann.“, XXXVI стр. 141.

⁶ „Pogg. Ann.“, LXII, стр. 132, 1844. Joh. Aug. Natterer (родился в 1813 г.)— практикующий врач в Вене.

126 СЖИЖЕНИЕ ГАЗОВ

водородом, и погрузил потом бутылку в кипящую воду, то водород оказался сжатым до $\frac{1}{480}$ своего первоначального объема, как это видно было по ртутному указателю, находившемуся между водородом и углекислотой, однако и при этом не было еще заметно никаких признаков его сжижения¹. Поэтому снова пришлось отказаться от мысли рассматривать газы только как пары жидкостей с весьма низкими температурами кипения и продолжать еще считать некоторые газы постоянными², по крайней мере, временно, так как опыты со сжатием все же показали, что *даже и эти постоянные газы при более высоких давлениях перестают следовать закону Мариотта и таким образом теряют характер идеальных газов*. Впрочем, уже и раньше неоднократно высказывались сомнения в полной применимости закона Мариотта. В 1827 г. Дебре³ показал, что различные газы при одном и том же давлении сжимаются неодинаково. С другой стороны, Дюлонг и Араго нашли, что, по крайней мере, для воздуха (на другие газы они не могли распространить своих опытов) этот закон вполне точен в пределах ошибок наблюдения. Реньо же⁴ затем определенно доказал, что и у так называемых постоянных газов объем не точно обратно пропорционален давлению и, как уже было указано ранее, утверждал, что воздух, азот и т. д. с возрастанием давления сжимаются сильнее, а водород меньше, чем этого требует закон Мариотта. Наттерер⁵ с помощью устроенного им для сгущения газов прибора нашел, что закон Мариотта достаточно точен для водорода до 78 ат давления, для кислорода до 77, для азота до 85, для воздуха до 96, для углекислоты до 12 ат; однако, в противоположность выводам Реньо, он утверждал, что все газы с возрастанием давления сжимаются меньше, чем следовало бы согласно закону Мариотта.

Такие же трудности, какие встретились при исследовании капиллярности, диффузии и т. д., представило также исследование *упругости твердых тел*, впервые в этот период более широко поставленное на экспериментальную почву. Прежние работы Гука, равно как и довольно обстоятельные исследования с Гравезанда⁶, имели свою целью больше изучение *относительных законов* упругих действий, чем измерение *абсолютных величин* последних. Действительную основу для таких измерений создал Т. Юнг, определивший в 13-й лекции своих «Lectures

¹ По Бертелло, „Ann. de chim. et. de phys." (2), XXX, стр. 237.

² Наттерер говорит („Pogg. Ann.", XCIV, стр. 436): „Прежние опыты сделали почти достоверным, что одним механическим давлением нельзя достигнуть желаемой цели, т. е. обратить постоянные газы в жидкое и твердое состояние". Но Фарадей, который в 1845 г. снова путем сжатия перевел в жидкое состояние различные газы при весьма низких температурах (до -110° C), более определенно ищет причину неудачи в том, что *для сжижения постоянных газов температура все еще была слишком высока* („Phil. Trans.", стр. 155, 1845). Он говорит буквально: „*There are, in fact, some results producible by cold which no pressure may be able to effect*" („в действительности существуют некоторые результаты, полученные с помощью холода, которых нельзя достичь никаким давлением").

³ „Ann. de chim. et de phys." (2), XXXIV, 1827

⁴ „Mém. de l'Acad.", XXI; „Pogg. Ann.", LXVII, стр. 534.

⁵ „Pogg. Ann.", XCIV, стр. 436, 1855.

⁶ „Elements de physique", I, стр. 346—376, Leyden 1746.

on natural philosophy» (London 1807) *коэффициент упругости* как вес, который в состоянии удлинить стержень с поперечным сечением, равным единице, на его собственную длину. Новые экспериментальные исследования были вызваны к жизни все более настоятельными требованиями техники, затем упомянутыми уже ранее теоретическими исследованиями знаменитых математиков Пуассона и Коши, а также все возрастающим интересом физиков к действию молекулярных сил. Тщательные, точные измерения упругости железа были опубликованы Лагергельмом еще в 1827 г.¹ Он определял коэффициент упругости сначала непосредственно, а затем вычислил его на основании тонов продольных колебаний рассматриваемых железных стержней. Полученные им результаты оказались согласными с теоретическими выводами Пуассона в том отношении, что поперечное сжатие при растяжении проволок и стержней не вполне компенсирует их удлинения и что железо при растяжении испытывает *увеличение объема*, вследствие чего удельный вес его с 7,821 снижается до 7,777. Но относительно наиболее полные измерения упругости предпринял Вертгейм² в промежуток времени от 1844 до 1860 г. В 1844 г.³ он дал в трех статьях для различных металлов и металлических сплавов следующие таблицы: а) *коэффициентов упругости*, полученных как путем прямой нагрузки, так и из наблюдения продольных и поперечных колебаний; б) *пределов упругости*, т. е. весов, которые в стержне 1 мм² поперечного сечения вызывают стойкое не исчезающее уже удлинение на 0,00005 его длины; в) *максимальных стойких удлинений* перед разрывом; г) *весов*, которые вызывают *разрыв* при медленной или быстрой нагрузке, и, наконец, д) *скоростей звука*, вычисленных из тонов продольных колебаний. В качестве общих выводов из своих исследований он, между прочим, нашел, что *коэффициенты упругости изменяются под влиянием тех же обстоятельств, что и плотности; что из наблюдений тонов продольных и поперечных колебаний для этих коэффициентов получаются одни и те же величины, однако несколько большие, чем из наблюдения непосредственных удлинений; что даже самая ничтожная нагрузка вызывает стойкое, не исчезающее удлинение и что максимальное удлинение, равно как и крепости тела, бывают больше при медленной нагрузке, чем при быстрой*. За этими исследованиями в 1846 г.⁴ последовали измерения *упругости и крепости различных видов дерева*, а в 1847 г.⁵ *различных сортов стекла*, которые Вертгейм произвел совместно с Шевандье. Согласно последней работе плотность одних и тех же сортов бывает одинакова, вылитое ли стекло или выдуто, но в медленно охлажденном стекле она на 0,0045 больше, чем в быстро охлажденном, откуда следует, что в *быстро охлажденных стеклах*

¹ „Försök att bestämma valsadt och smidt jerns täthet, jemnhet, smidbarhet och styrka“, Stockholm 1827. Pehr Lagerhjelm (1787—1856) — чиновник горного ведомства в Стокгольме.

² Wilhelm Wertheim (1815—1861) — с 1855 г. экзаменатор в Политехнической школе в Париже.

³ „Pogg. Ann.“, LVII, стр. 382; дополнительный том II, стр. 1 и 73.

⁴ „Pogg. Ann.“, дополнительный том II, стр. 481.

⁵ Там же, стр. 115.

внутренние слои должны находиться в состоянии очень сильного растяжения. Коэффициент упругости стекла растет с его плотностью, причем коэффициент, вычисленный с помощью звуковых тонов, больше, чем полученный путем непосредственного наблюдения. В том же году Вертгейм¹ опубликовал свои исследования над упругостью главных тканей человеческого тела, а в следующем² — упомянутые уже ранее опыты над отношением продольного удлинения к поперечному сжатию. Непостоянство этого отношения было позднее установлено Кирхгофом³, Коозеном⁴, Окатовым⁵ и др. В 1854 г.⁶ Вертгейм представил различные положения о соотношении между упругостью минералов и их химическим составом, приведшие, однако, к малонадежным результатам. В 1857 г. он вновь очень обстоятельно исследовал упругость при кручении⁷, определяя зависимость угла кручения непосредственно, а не косвенно, путем наблюдения скорости колебаний, вызываемых кручением, как это раньше сделал Кулон. Последние работы Вертгейма касаются объемной сжимаемости твердых тел и упругости при сгибании. Но особенно обстоятельно исследовал последнюю в ряде работ Сен-Венан⁸, опубликовавший также солидные работы по упругости кручения.

Теоретически и систематически, а также настолько полно, насколько это было возможно в то время, проблемы упругости были разработаны Ламе в его «Leçons sur la théorie de l'élasticité, Paris 1852 г. («Лекции по теории упругости»), Клебшем в «Theorie der Elasticität fester Körper», Leipzig 1862 г. («Теория упругости твердых тел») и Беером в «Einleitung in die mathematische Theorie der Elasticität», Leipzig 1869 г. («Введение в математическую теорию упругости»).

ОПТИКА (приблизительно от 1840 до 1860 г.). Волновая теория света уже в предыдущем периоде достигла всеобщего признания. Формулы, выведенные Френелем, Швердом и Коши, давали в столь многих случаях столь точное совпадение с наблюдениями, что сомнения в правильности этой теории были уже невозможны. Однако от проницательных умов не могло ускользнуть то обстоятельство, что и, опираясь на волнообразную теорию, математическая разработка явлений во многих случаях наталкивается на затруднения, причем это бывает как раз в случаях обыкновенных, повседневных явлений. Мы уже упомянули о том, сколько было затрачено труда на доказательство одной только возможности разложения света на цвета при его преломлении. Равным образом мы отметили, каким образом Коши доказал эту возможность, как он постоянно стремился привести свои формулы в возможно лучшее согласие с результатами наблюдений и как другие

¹ „Ann. de chim. et de phys." (3), XXI, стр. 385, 1847; а также в „Comptes rendus", XXII, стр. 1151, 1846.

² „Ann. de chim. et de phys." (3), XXIII, стр. 52, 1848.

³ „Pogg. Ann.", CVIII, стр. 369.

⁴ Там же, CI, стр. 401.

⁵ Там же, CXIX, стр. 11.

⁶ „Cosmos" (par Moigno), IV, стр. 518.

⁷ „Ann. de chim. et de phys." (3) L, стр. 202.

⁸ Подробно в „Journal de Liouville". (2), I, стр. 89, 1856. А. J. Cl. Barré de Saint-Venant (1797—1886) — профессор École des ponts et chaussées в Париже.

ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА ОТ ПРОЗРАЧНЫХ ТЕЛ 129

выдающиеся физико-математики вплоть до новейшего времени старались дальше развить его идеи или же их исправить. Однако кроме вопроса о разложении света на цвета для волновой теории оставались неразрешенными в оптике еще некоторые другие проблемы, которые задали много работы математикам.

Уже для теории истечения осталась неразрешенной задача объяснить, почему при *отражении* света всегда *отражается* только *часть* его, *другая же часть поглощается* отражающим телом. Юнг указывал на эту неудачу как на главный довод против теории истечения и отрицал возможность разрешения как раз этой проблемы с точки зрения последней. Однако скоро выяснилось, что и волновая теория здесь встречается с совершенно такими же трудностями.

Для объяснения отражения света от *прозрачных* тел Френель прибегнул к отнюдь не очевидному допущению, *что в телах эфир имеет бо'льшую плотность, чем вне их, сохраняя при этом одинаковую упругость, и что изменение плотности происходит скачком на некоторой определенной поверхности, на которой происходят как отражение, так и преломление*¹. Сделав, далее, предположение (что было естественно, если пренебречь поглощением света в телах), *что сумма живых сил преломленного и отраженного лучей света должна быть равна живой силе падающего луча*, он мог показать, что для известного угла отражения (*угла поляризации*) весь свет, поляризованный в плоскости падения, должен полностью отразиться, а поляризованный в перпендикулярной плоскости должен весь проходить, и смог, таким образом, определить интенсивность этих лучей света. Точно так же он смог тогда определить для любого угла падения интенсивность обоих перпендикулярно друг другу поляризованных отраженных лучей, а также обоих перпендикулярно друг другу поляризованных преломленных лучей². Соответствующие формулы Френеля вообще достаточно хорошо согласовались с имевшимися наблюдениями Малюса, Брюстера и др. Однако уже и тогда в отдельных случаях выявились некоторые расхождения. Брюстер³ в 1815 г. и Зеебек⁴ в 1830 г. нашли, что *не у всех веществ свет, поляризованный под углом поляризации, бывает вполне поляризован в одной и той же плоскости*. Отсюда Эри в 1833 г.⁵ сделал вывод, что *у многих веществ отраженный свет поляризуется не прямолинейно, а эллиптически*, или же, что между двумя лучами, поляризованными

¹ Если мы допустим, как это обычно делается, что весомые молекулы притягивают молекулы эфира, то большая плотность последнего в телах представляется логически обоснованной; можно было бы, далее, допустить, что вероятное при этом увеличение упругости эфира в телах нейтрализуется меньшей подвижностью эфирных молекул, проистекающей от действия сил притяжения. Для противоположного допущения *большей упругости эфира в телах при одинаковой его плотности*, на основе которого Франц Нейман („Abh. der Berliner Akad.", 1835) тоже вывел формулы Френеля, как будто труднее подыскать правдоподобное обоснование.

² „Ann. de chim. et de phys." (2), XVII, стр. 190 и 312, 1821 и XLVI, стр. 225, 1831; „Pogg. Ann.", XXX, стр. 255 и дополнительный том II, стр. 332.

³ „Phil. Trans.", стр. 125, 1815.

⁴ „Pogg. Ann.", XX, стр. 27.

⁵ „Philosophical Magazine" (3), I, стр. 25, 1833; „Pogg. Ann.", XXVIII, стр. 83.

130 ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА ОТ ПРОЗРАЧНЫХ ТЕЛ

перпендикулярно друг к другу, существует *разность фаз*; однако это предположение представлялось неприемлемым с точки зрения френелевского допущения об отражении света от поверхности и было несовместимо с его формулами. В то время подобные явления считались еще исключениями; однако в конце сороковых годов Жамен¹ показал, что они составляют правило. Он доказал точными опытами, что при отражении света от прозрачных тел происходит вообще (как это было уже давно установлено при металлическом отражении) замедление одного из отраженных лучей по сравнению с другим лучом, поляризованным перпендикулярно к первому, вследствие чего между ними образуется разность фаз и весь отраженный свет оказывается поляризованным не прямолинейно, а эллиптически. Жамен определил также величину вызванной отражением разности фаз для многих веществ и при этом заметил, что не всегда поляризованный в одном и том же направлении луч отстает по фазе от другого луча, но что это замедление зависит от природы отражающего вещества: в веществах с более сильным преломлением обыкновенно запаздывает луч, поляризованный перпендикулярно к плоскости падения, а в других случаях — второй луч. Но есть и такие тела, у которых замедления, а, следовательно, и эллиптической поляризации, вовсе не бывает². Коши³ попытался учесть и эти явления в своей теории отражения, и Жамен определенно признал, что формулы Коши достаточно хорошо согласуются с наблюдением и являются, во всяком случае, единственными, дающими удовлетворительное разрешение вопросов, касающихся отражения света⁴ — в противоположность формулам Френеля, которые можно признать только приблизительно верными, поскольку эллиптичность отраженного света незначительна. В основе теории отражения Коши лежала мысль, что на пограничной поверхности обеих сред образуются также и продольные волны, интенсивность которых с удалением от этой поверхности убывает, правда, так быстро, что на неизмеримо малом расстоянии они уже исчезают. Однако эта мысль была большинством физиков оставлена и заменена более естественным предположением, что на границе сред плотность эфира изменяется не скачками, а постепенно, вследствие чего как отражение, так и преломление света происходят не сразу на одной поверхности, а постепенно. Следует, однако, заметить, что и это построение в том виде,

¹ Jules Célestin Jamin (1818—1886) — профессор физики в Политехнической школе и Сорбонне в Париже.

² „Comptes rendus“, XXII, стр. 477; XXVI, стр. 383; XXVII, стр. 147; „Ann. de chim. et de phys.“ (3), XXIX, стр. 263, 1850; „Mém. sur la réflexion a la surface des corps transparents“.

³ „Comptes rendus“, VIII, стр. 560; IX, стр. 729, 1839; XXVIII, стр. 124, 1846; XXXI, стр. 160. Более простое и удобопонятное, чем у автора, изложение теории отражения Коши дали А. Беер („Pogg. Ann.“, XCI и XCII), также Эйзенлор („Pogg. Ann.“, CV, стр. 346), Лундквист („Pogg. Ann.“, CLII, стр. 177, 398 и 565) и др. Джемс Уокер („An acc. of Cauchy's Theory of Reflection a. Refraction of Light“, „Philosophical Magazine“ (5), XXIII, стр. 151) различает три различные ступени в развитии теории света Коши (1830, 1836 и 1839 гг.), из которых каждая последующая всегда сводит на нет предыдущую.

⁴ „Ann. de chim. et de phys.“ (3), XXX, стр. 264.

ПОЛНОЕ ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА. АБЕРРАЦИЯ 131

как его пытались осуществить Лоренц¹ и другие, нельзя еще считать вполне удавшимся. С допущением *постепенного хода преломления* легче увязывались теперь и явления *полного отражения света*. Уже Ньютон, допускавший вообще существование тонкого промежуточного слоя на границе между двумя оптически различными средами, принимал, что при полном отражении свет *вступает из более плотной среды в менее плотную* и затем отсюда возвращается назад вследствие более сильного притяжения света более плотную средою. Он даже определил, что путь, описываемый светом в менее плотной среде, представляет собою ветвь *параболы*². К его мнению, конечно, безоговорочно присоединились все приверженцы теории истечения; Гюйгенс³ и его сторонники тоже допускали вступление света в менее плотную среду, хотя объяснить возвращение волнообразного движения в более плотную среду им было гораздо труднее, чем сторонникам теории истечения. Юнг⁴ прибегнул к предположению, что частицам менее плотной среды движение передается лишь в некоторой части, но притом таким образом, что эта передача имеет своим последствием сопротивление дальнейшему проникновению колебания со стороны этих частиц. Френель⁵ нашел, что при полном отражении один из поляризованных лучей замедляется по сравнению с другим перпендикулярным к нему поляризованным лучом на $\frac{1}{8}$ длины волны, и затем пытался из своих формул вывести более глубокое проникновение одного из лучей в менее плотную среду. Эти формулы дали для *амплитуд отраженного света*, при переходе его в менее плотную среду, для определенных углов падения, *комплексные величины*. *Появление мнимости* Френель объяснил тем, что *соответствующая часть света отражается не на поверхности раздела обеих сред, как это было принято для расчета, а дальше, позади нее*. Однако впоследствии Квинке⁶ точными измерениями доказал, что при полном отражении свет может проникнуть в менее плотную среду на глубину *нескольких длин волн* и что глубина эта для лучей, поляризованных перпендикулярно к плоскости падения, вообще *больше*, чем для лучей, поляризованных в самой плоскости. Как в теории отражения, так и в *абerrации* света трудности возникли как раз там, где до сих пор все считалось удовлетворительно объясненным. Как и в первое время после открытия этого явления, так и теперь абerrацию продолжали пояснять ссылкой на пример камня, движущегося прямолинейно и равномерно по трубке, имеющей в свою очередь самостоятельное движение под некоторым углом к траектории камня. Для того чтобы применить подобное объяснение к абerrации, *необходимо было предположить, что свет, исходящий от звезд, не отклоняется от прямолинейного направления своего движения и в сфере движущейся земли*. Но такое предположение, будучи достаточно

¹ „Pogg. Ann.“, CXI, стр. 460, 1860.

² „Principia mathematica“, 2 изд., стр. 206, 1713.

³ „Traité de la lumière“, стр. 38, 1690.

⁴ „Lectures on nat. phil.“, II, стр. 623, London 1807.

⁵ „Ann. de chim. et de phys.“ (2), XXIX, стр. 175, 1825; XLVI, стр. 241, 1831.

⁶ „Pogg. Ann.“, CXXVII, стр. 1 и 199, 1866.

132 УЧАСТИЕ ЭФИРА В ДВИЖЕНИИ ВЕСОМЫХ ТЕЛ

вероятным для теории истечения, ни в коем случае не могло быть таковым для волновой теории: в самом деле, легко было предположить, что поток световых частиц беспрепятственно пронизывает атмосферу движущейся земли; *но чтобы исходящее от звезд волнообразное движение эфира продолжалось без изменения своего направления в эфире, находящемся на движущейся земле, этого, во всяком случае, нельзя было принять безоговорочно.* Стокс уже в 1846 г. утверждал, что распространение света, *приходящего из небесных пространств, не может оставаться прямолинейным в движущемся эфире земли и что поэтому обычное объяснение aberrации несостоятельно.* Челлис² возразил на это, что, наоборот, из полного соответствия старой теории aberrации данным наблюдения следует заключить, что предпосылка этой теории верна и что, следовательно, распространение света в теле не зависит от его движения. Физо указал, что по поводу отношения содержащегося в теле эфира к его движению возможны три гипотезы: 1) эфир связан неразрывно с частицами тел и движется вместе с ними; 2) эфир совершенно свободен и движение тел на него нисколько не влияет; 3) эфир только в одной части связан с движениями весомих частиц, а в другой части совершенно свободен. Для выбора между этими тремя гипотезами Физо поставил новые, чрезвычайно остроумные опыты³. Каждый из двух пучков света, исходивших из одного и того же источника и, в конце концов, приводившихся к интерференции, проходил на своем пути через трубу, наполненную водою. Обе трубы были равной длины, но в одной из них вода двигалась с довольно значительною равномерною скоростью в направлении распространения световых лучей, а в другой — с такой же скоростью в противоположном направлении. За исключением этого последнего обстоятельства оба пучка до интерференции проходили совершенно одинаковые пути и были поставлены в совершенно равные условия. При этом наблюдении Физо установил, что при движении воды в трубах интерференционные полосы оказывались смещенными по отношению к тем полосам, которые возникали, когда вода в трубках оставалась в покое, причем смещение всегда происходило в сторону тех лучей, которые двигались навстречу воде. *На этом основании он счел наиболее вероятной третью из вышеприведенных гипотез, т. е. что эфир, заключенный в движущемся теле, частично участвует в этом движении, а частично остается в покое.* В дальнейших своих опытах при замене движущейся воды движущимся воздухом он не заметил никакого смещения интерференционных полос и отсюда заключил, *что в газах влияние их движения на содержащийся в них эфир неизмеримо мало;* поэтому и прежняя теория aberrации, поскольку последняя касается, главным образом, прохождения света

¹ „Philosophical Magazine" (3), XXVII, стр. 9, 1846.


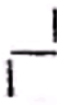
² „Philosophical Magazine" (3), XXVII, стр. 321. Стокс, который вообще имел ряд научных дискуссий с Челлисом, вел с ним длинную переписку и по вопросу об aberrации света. James Challis (1803—1882) — духовное лицо, профессор физики и астрономии.

³ „Comptes rendus", XXXIII, стр. 343, 1851. „Pogg. Ann.", дополнительный том III, стр. 437. Hippolyte Fizeau (1819 — 1896) — с 1863 г. профессор физики в Парижской политехнической школе.

УЧАСТИЕ ЭФИРА В ДВИЖЕНИИ ВЕСОМЫХ ТЕЛ 133

через воздух, остается в силе ¹. К точке зрения Физо полностью присоединился Беер ², но только он полагал, (что, впрочем, не изменяет сути дела), *что не часть эфира участвует в движении весоных молекул, а весь эфир, но только он движется со скоростью, которая составляет лишь часть скорости движения тела*. Если скорость движущегося тела v , то скорость заключенного в нем эфира Беер положил равной uv ; u он назвал *коэффициентом замедления* соответствующего вещества. Затем он нашел $u=1-1/n^2$, где n — абсолютный показатель преломления; для воды он вычислил $u=7/16$, а для воздуха u равно только 0,000589 ³.

Упомянутые выше опыты Физо были произведены под влиянием других опытов, проведенных в это же время им самим, а также другими исследователями, и имевших своей целью определение *скорости распространения света на земле*. Уже в 1838 г., вскоре после измерения Уитстоном скорости распространения электричества, Араго высказал мысль, что при помощи вращающегося зеркала можно было бы определить если не абсолютную скорость света, то, во всяком случае, относительную скорость распространения его в различных средах. Если, — сказал он ⁴, — взять в качестве источника света электрическую искру, направленную параллельно оси вращения зеркала, и установить наполненную водою трубку длиною в 28 м таким образом, чтобы от одной половины светящейся линии свет проходил до зеркала через воду, а от другой проходил параллельно трубке через воздух, то при вертикальной оси вращения и при прохождении через воду света от верхней половины светлая линия в зеркале по теории истечения

должна иметь форму , а по волновой теории форму , Таким

¹Позднее Физо исследовал также влияние движения твердых тел на заключающийся в них эфир. По Малюсу, Био и Ерюстеру плоскость поляризации светового луча, при прохождении через наклонную пластинку стекла, испытывает вращение, зависящее, между прочим, от показателя преломления, а, следовательно, и от скорости света. Соответственно этому Физо пропускал световые лучи через стеклянную пластинку с параллельными стенками один раз таким образом, что движение света совпадало по своему направлению с тем движением пластинки, которое она имела вследствие вращения земли, а другой раз в противоположном ему направлении. При этом наблюдаемые вращения плоскости поляризации действительно обнаружили ясно заметную зависимость от движения земли, хотя численные результаты довольно сильно между собою расходились („Comptes rendus", XLIX, стр. 717, 1859 г., „Pogg. Ann.", CIX стр. 160 и „Ann. de chim. et de phys." (3), LVIII, стр. 129, 1860; „Pogg. Ann.", CXIV, стр. 554). Фай („Comptes rendus", XLIX, стр. 870; „Pogg. Ann.", CIX, стр. 170) отметил, что Физо при этих исследованиях не принял во внимание влияния собственного движения всей солнечной системы, а Тессан против этого возразил („Comptes rendus", XLIX, стр. 980), что это движение не может иметь влияния, так как оно присуще и солнечному свету.

² „Pogg. Ann.", XCIII, стр. 213. Aug. Beer (1825—1863) — профессор математики и физики в Бонне.

³ „Pogg. Ann.", стр. 217.

⁴ „Comptes rendus", VII стр. 954, 1838; „Pogg. Ann.", XLVI; стр. 28.

134 СКОРОСТЬ СВЕТА

образом можно было бы надежно разрешить вопрос о правильности той или иной из этих двух теорий. Сам Араго не осуществил этого своего предложения вследствие слабости зрения, и лишь в 1850 г. он мог сообщить Парижской академии наук, что его план будет приведен в исполнение Фуко¹. Вскоре затем Фуко² действительно сообщил, что опыты его вполне удались и что он, следуя методу Араго, *определенно установил замедление света в воде по сравнению с воздухом, и, таким образом, прямо подтвердил волновую теорию света*. Вслед за этим Физо и Брегэ³ со своей стороны сообщили, что и они аналогичным путем пришли к принципиально схожим результатам.

Уже за год до того Физо устроил прибор, в котором вращающееся зеркало было заменено вращающимся зубчатым колесом, с тем, чтобы иметь возможность определить не только относительную, но и *абсолютную скорость света*⁴. Зрительные трубы общеизвестного прибора были поставлены на расстоянии 8633 м друг от друга, а колесо имело 720 зубцов. Свет исчез, когда скорость вращения колеса была доведена до 12,6 оборотов в секунду; при двойной скорости он вновь появился, а при тройной снова исчез, что придавало особенную достоверность выводам из этих наблюдений. Из 28 таких измерений он вывел, в качестве наиболее вероятной величины для скорости света, *70 948 лье, или 42 569 географических миль*, что, во всяком случае, несколько превышает действительную скорость. 13 лет спустя Фуко⁵ при помощи прибора, который опять-таки был снабжен вращающимся зеркалом Араго, удалось измерить скорость света в пределах комнаты, для чего путь света был удлинён до 20 м посредством отражения его от 5 вогнутых зеркал. При этом он с точностью до 0,002 нашел скорость света равной *298 000 км или 39 136 географических миль* (в безвоздушном пространстве). С этими результатами хорошо согласовались и многочисленные более поздние измерения. А. Корню⁶ в 1873 г. получил с усовершенствованным прибором Физо *298 500 км*, а в следующем году *300 330 км*. Альберт Майкельсон⁷, при помощи усовершенствованного метода Фуко, получил число *299 954±50 км*, а Юнг и Форбс⁸ по способу Физо — *301 382 км*. Указанное расхождение результатов дало повод заподозрить, не зависит ли скорость света от природы излучаемого света и не изменяется ли она вместе с нею. Мюллер⁹ в 1872 г. высказал предположение, что скорость света, может быть, зависит от интенсивности последнего, а Форбс и Юнг сообщили, что они заметили различие скорости при различных цветах.

¹ „Comptes rendus“, XXX, стр. 489, 1850.

² Там же, XXX, стр. 551; „Pogg. Ann.“, LXXXI, стр. 434.

³ „Comptes rendus“, XXX, стр. 562 и 771; „Pogg. Ann.“, LXXXI, стр. 442 и LXXXII, стр. 124.

⁴ „Comptes rendus“, XXIX, стр. 90, 1849; „Pogg. Ann.“, LXXIX, стр. 167.

⁵ „Comptes rendus“, LV, стр. 501 и 792, 1862; „Pogg. Ann.“, CXVIII, стр. 485 и 588.

⁶ „Comptes rendus“, LXXVI, стр. 338, 1873 и LXXX, стр. 1361.

⁷ „Nature“, XVIII, стр. 195.

⁸ Там же, XXIV, стр. 303, 1881.

⁹ „Pogg. Ann.“, CXLV, стр. 86, 1872. J. J. Müller (1846—1875) — профессор Цюрихской политехнической школы.

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ. ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА 135

Однако эти предположения большинством физиков не были поддержаны. Что касается более значительных расхождений этих результатов с полученными раньше на основании астрономических данных, то их объяснили тем, что для расстояния от солнца до земли было принято несколько преувеличенное число.

Около этого же времени Физо и Фуко ¹ воспроизвели еще одно явление, очень интересное для волновой теории света. Два световых луча могут лишь тогда интерферировать, когда они находятся в противоположных фазах, в остальном же находятся в совершенно одинаковых состояниях колебания; поэтому части светового луча, происходящие от единого источника, могут интерферировать лишь в том случае, если между ними каким-либо образом создается разность фаз. Возникает вопрос, должна ли эта разность фаз интерферирующих лучей составлять лишь одну полуволну или же она может равняться некоторому кратному числу волн плюс одна полуволна. Путем опытов с толстыми пластинками оба физика подтвердили последнее: им удалось получить интерференцию даже между лучами с разностью хода в 7394 волны. Поэтому они свою работу заканчивают следующими словами: *«Наличие этих явлений взаимного влияния двух лучей в случае большой разности хода интересно для теории света, поскольку оно выявляет в излучении последовательных волн неизменную регулярность, какой до сих пор не обнаружилось ни одно явление»* ².

В необходимой связи с явлениями отражения и преломления находятся явления поглощения света, тем более что и те и другие оказываются связанными с состоянием поляризации соответствующего света. Уже Био ³ заметил, что кристаллы турмалина пропускают лишь необыкновенный луч, обыкновенный же луч при достаточной толщине пластинки кристалла полностью поглощается. Подобные же явления избирательного поглощения наблюдали потом и на других кристаллах, но этого процесса глубже не исследовали. И вот Гайдингер ⁴ установил, что подобно преломлению поглощение света зависит от вида оптической упругости среды, через которую проходит свет; что только в изотропных средах поглощение происходит одинаково по всем направлениям, тогда как в одноосных кристаллах оно в направлении оси происходит совершенно иначе, чем перпендикулярно к ней, и, наконец, в двуосных кристаллах оно происходит различно по всем направлениям с различной упругостью. К этому он добавил, что такое избирательное поглощение не только вообще изменяет интенсивность света, но может различным образом изменять различные цвета этого света. Эти явления, названные Гайдингером для одноосных кристаллов *дихроизмом*, а для двуосных *плеохроизмом*, он наблюдал на многих кристаллических веществах, но общих законов этого вида поглощения он не мог открыть. Явления поглощения света в прозрачных средах позволяли думать,

¹ „Ann. de chim. et de phys." (3), XXX, стр. 146, 1850; „Pogg. Ann.", дополнительный том II, стр. 355.

² „Ann. de chim. et de phys." (3), XXX, стр. 159, 1850.

³ См. первый выпуск настоящей части, стр. 155—156.

⁴ „Pogg. Ann.", LXV, стр.1 и сл., 1845. W. Haidinger (1795—1871) — директор Геологического института в Вене.

136 ФОСФОРЕСЦЕНЦИЯ

что движения колеблющихся частиц светового эфира могут хотя бы частично восприниматься молекулами тела и превращаться в другие формы силы — вероятнее всего в теплоту. Но одновременно обратили на себя внимание процессы, указывающие на то, что во многих случаях эфирные колебания, поглощенные весомой материей, возвращаются ею обратно эфиру и в более или менее измененном виде снова появляются в качестве света. Этими процессами, которые прямо наводили на мысль об оптическом резонансе, аналогичном гармоническому резонансу, явились фосфоресценция и флюоресценция света.

В прежнее время интерес физиков к явлениям фосфоресценции ограничивался тем, что разыскивали или составляли такие вещества, которые, будучи подвергнуты предварительно действию света, после этого сами собою светились очень сильно или очень долго. Теория истечения, допускавшая существование особого светового вещества, легко объясняла эти явления более значительным накоплением светового вещества в соответствующих телах и последующим затем постепенным его выделением наружу. Наоборот, в волновой теории подходящего объяснения сначала не находилось, поэтому экспериментирование с этими явлениями на первых порах отступило на задний план. Лишь после того как ученые начали более всесторонне сопоставлять волнообразные движения эфира с движениями других упругих сред, например, воздуха, после того как все более начала всплывать идея резонанса и в области света, — снова усердно принялись за изучение фосфоресцирующих тел. П. Рисс¹ в 1845 г. подтвердил опытами над алмазами известный уже со времени Вильсона факт, что фосфоресценция вызывается преимущественно лучами с большей преломляемостью, красные же лучи ее ослабляют. В 1851 г. Дрэпер² на основании своих исследований фосфоресценции плавленого шпата, вызванной электрическим светом, пришел к следующим выводам, которые следует признать несколько неравноценными: 1) во время свечения объем фосфоресцирующего тела не испытывает заметного изменения; 2) фосфоресценция, по-видимому, не вызывает никакого изменения в структуре тела; наоборот, 3) под ее влиянием, по-видимому, изменяется поверхность светящегося тела (пары ртути неодинаково сгущаются на местах темных и светящихся); 4) фосфоресцирующее тело, несомненно, излучает вместе со светом и теплоту; 5) тело, фосфоресцирующее под влиянием солнечного света, не проявляет признаков электричества; 6) абсолютное количество света, излучаемого телом путем фосфоресценции, крайне ничтожно; 7) фосфоресценция находится в связи с температурой тела — она тем сильнее, чем холоднее было тело во время его освещения. Но больше всех и, пожалуй, с наибольшим успехом занимался проблемой фосфоресценции Эдмон Беккерель³. Его работы по данному вопросу, которые стали появляться, начиная с 1839 г., в «Com-

¹ „Pogg. Ann.“, LXIV, стр. 334, 1845.

² „Philosophical Magazine“ (4), I, стр. 81, 1851. J. Will. Draper (1811—1882) — напоследок профессор химии и физиологии в Нью-Йорке, автор „Истории умственного развития Европы“.

³ Alexandre Edmond Becquerel (1820—1891) — сын Антуана Сезара Беккереля, профессор физики в Париже.

ptes rendus» Парижской академии наук, а затем в «Annales de chimie et de physique», были впоследствии собраны в особом труде «La lumière, ses causes et ses effets», 2 тома, Paris 1867/68 гг. («Свет, его причины и действия»); однако главнейшие достигнутые им результаты, а также описание фосфороскопа, были изложены уже в его работе 1859 г. «Rechers sur les divers effets lumineux qui résultent de l'action de la lumière sur les corps», «Ann. de chim. et de phys.» (3) LV, стр. 5—119 («Исследование различных световых эффектов, получающихся от действия света на тела»). Фосфороскоп состоял из двух вращающихся на общей оси дисков; на каждом из них было сделано по одному отверстию, из которых одно служило для пропускания света, а другое — для наблюдения. Оба отверстия были сделаны не прямо друг против друга, а таким образом, что перед глазом наблюдателя сначала проходило отверстие для света, а затем уже второе отверстие. Для устранения всякого постороннего света диски были помещены в прочно установленном барабане, в плоских сторонах которого, соответственно отверстиям в дисках, были прорезаны два отверстия, но расположены прямо противоположно друг другу. В направлении линии, соединяющей последние, в пространстве между дисками помещалось тело, исследуемое с точки зрения его фосфоресценции. При помощи рукоятки и зубчатых колес диски можно было приводить в столь быстрое вращение, что тела можно было наблюдать уже спустя $1/2000$ сек. после их облучения солнечным светом. Беккерель различает следующие виды фосфоресценции: 1) *фосфоресценцию вследствие простого повышения температуры, зачастую ниже температуры красного каления* (алмаз, плавиковый шпат); 2) *фосфоресценцию от механических действий кристаллизации или раскола*; 3) *фосфоресценцию от электричества* (свечение трубок с разреженными газами при прохождении электрического тока); 4) *самопроизвольную фосфоресценцию* (животные и растения); 5) *фосфоресценцию от инсоляции*. Для *последней* (наиболее обычной) он далее устанавливает следующие частные положения: 1) наиболее деятельными лучами являются фиолетовые и ультрафиолетовые; 2) для различных веществ части спектра, вызывающие фосфоресценцию, имеют неодинаковую длину и лежат в различных местах; 3) цвет излучаемого при фосфоресценции света является для каждого тела особым и не находится ни в какой связи с цветом света, вызывающего фосфоресценцию; 4) часть спектра (менее преломленная) уничтожает фосфоресценцию, вызванную облучением фиолетовыми лучами; 5) если фосфоресцирующее тело поместить в темное место, то фосфоресценция постепенно ослабевает и прекращается, но она может быть вновь вызвана последующим затем нагреванием тела; б) повышение температуры во время облучения тела солнцем ослабляет наступающую затем фосфоресценцию; 7) если спектр, дающий при обычных условиях фраунгоферовы линии от *A* до *H*, отбросить на бумагу, покрытую сернистым кальцием, то спектр значительно удлиняется, так что можно рассмотреть линии от *A* до *P*¹.

¹ Последнее положение имеется уже в статье, помещенной в „Ann. de chim. et de phys.“ (3), IX, стр. 120, а также в „Bibliothèque universelle“ за ав-

138 ФЛЮОРЕСЦЕНЦИЯ

При помощи своего фосфороскопа Беккерель открыл много *новых* фосфоров и прежде всего установил, что *всем флюоресцирующим веществам присуща некоторая, хотя бы и слабая, фосфоресценция*. На этом основании он был склонен думать, что *флюоресценция* есть не что иное, как фосфоресценция *во время облучения*. Этот взгляд получил в то время всеобщее признание.

Длительность эффекта при фосфоресценции и мгновенное прекращение его при флюоресценции пытался объяснить А. Г. Эмсмманн ¹. По его мнению, по отношению к световым колебаниям тела ведут себя в такой же мере различно, как сталь и железо по отношению к магнитным действиям. Атомы тела должны обладать, по его мнению, по отношению к движению, сообщенному телу путем облучения, некоторой *сдерживающей силой*, которая стремится сохранить имеющееся в данный момент расположение атомов; в фосфоресцирующих телах эта сила должна быть относительно большой, а в флюоресцирующих незначительной. Следует, однако, заметить, что это выражение «сдерживающая сила» настолько легковесно по своему содержанию, что действительно объяснить им какие-либо явления не представляется возможным.

Флюоресценция имела очень своеобразную и во многих отношениях поучительную судьбу. Первое наблюдение флюоресценции описал, как мы это видели во 2-й части настоящего сочинения, Николо Монардес в XVI веке; затем Кирхер обстоятельно занялся этими явлениями в 4-й главе своей книги «*Ars magna lucis et umbrae*» («*Великое искусство света и тени*»,) и, наконец, Бойль описал эти явления более точно в своем духе. Со времени Ньютона в оптике стал преобладать математический метод; поэтому наблюдения фосфоресценции отошли на задний план и были преданы забвению. Только Гете ², широкий кругозор которого проявился в частности и в его учении о цветах, снова напомнил о наблюдениях Кирхера. Однако в то время *почечное дерево* перестало уже применяться в медицинской практике и очень редко встречалось в аптеках; поэтому в «*Прибавлениях к учению о цветах*», в главе «*Мутные настои*» ³ Гете указывает, как приготовить, по способу химика Деберейнера, водный экстракт из *дерева квасии* (*Lignum quassiae*), обладающий такими же оптическими свойствами, как экстракт почечного дерева (последнее, по Гете, происходит, от *Guilandina Linaei*); к этому он лично прибавил еще следующее новое наблюдение: «Если полоску свежей коры *дикого каштана* погрузить в стакан с водою, то очень скоро вода окрасится в небесно-голубой цвет, если стакан, освещенный издали, рассматривать на темном

густ 1842 г. По вопросу о том, кто первый наблюдал *удлинение спектра*, было много споров. Во всяком случае, известно, что Дж. Гершель в том же 1842 г. наблюдал подобное удлинение, отбросив спектр на бумагу, пропитанную куркумовой настойкой („*Phil. Trans.*“, стр. 181, 1842; „*On the action of the rays of the solar spectrum on vegetable colours*“; о наблюдении с куркумовой настойкой см. стр. 194.)

¹ „*Pogg. Ann.*“, CXIV, стр. 654, 1861.

² *Sämmtl. Werke* в 36 томах, т. 34, стр. 58 и т. 35, стр. 101.

³ Там же, т. 35, стр. 297.

фоне, а с другой стороны, — в прелестный желтый цвет, если стакан держать против света». Но вследствие отрицательного отношения физиков к учению великого поэта о цветах на эти ценные наблюдения тогда не обратили внимания. Впрочем, и более поздние наблюдения флюоресценции, которые Брюстер в 1833 г. произвел над хлорофиллом ¹, а в 1838 г. — над плавиковым шпатом ², не были оценены по достоинству ни им самим, ни другими физиками. Лишь в 1845 г. Джон Гершель занялся надлежащим образом флюоресценцией, предчувствуя, что здесь кроется целый класс новых оптических явлений. Изучив это явление на многих веществах и, в особенности на сернистом хинине, он описал его в двух статьях, помещенных в «Philosophical Transactions» ³, причем здесь он его истолковал как случай дисперсии, происходящей только на поверхности тел, чем, по его мнению, и объясняется факт различной окраски тел в проходящем и отраженном свете. Подобную аномальную дисперсию он наблюдал на *зеленом плавиковом шпате* из Эльстон-Мора, отливающим с поверхности нежным синим цветом, на кислом (не щелочном) растворе *сернокислого хинина* и на *эскулине* и *калопене*, но не наблюдал ее ни на цинхонине, ни на салипине. Гершель полагал, что при этого рода *поверхностном отражении* свет изменяется особым образом, в зависимости от природы отражающего вещества, и назвал отраженный таким образом с поверхности свет *эпиполизированным* (epipolized), а все явление эпиполической дисперсией (epipolic dispersion). После этого Брюстер с новым рвением принялся за свои прежние наблюдения и пришел, в общем, к тем же фактическим выводам, что и Гершель, но только никак не мог согласиться с его объяснениями. Он выводил эти своеобразные явления ⁴ не из поверхностной, а наоборот, из *внутренней дисперсии*, вызываемой «множеством двоякопреломляющих кристаллов, у которых оси двойного преломления лежат во всевозможных направлениях и которые поэтому от своих задних поверхностей отражают свет поляризованным тоже во всевозможных направлениях». «Бесчисленное множество отражающих поверхностей воспринимает и отражает свет во всевозможных направлениях, поэтому глаз, где бы он ни находился, видит весь пучок как бы самосветящимся». Некоторые различия, которые обнаружились между наблюдениями Гершеля и его собственными, и, прежде всего — отсутствие каких-либо признаков поляризации у Гершеля, Брюстер приписывает тому обстоятельству, что Гершель пользовался для своих наблюдений обыкновенным дневным светом, он же применял для наблюдений

¹ „Edinb. Trans.", XII, стр. 542, 1834 (читано в 1833 г.).

² Rep. on the VIII meeting of the brit. Assoc. for the adv. of science, Trans, of the sections, стр. 10

³ „'Αμορφωτα" № 1: „on a case of superficial colour presented by a homogeneous liquid internally colourless", „'Αμορφωτα", №2: „on the epipolic dispersion of light", „Phil. Trans.", стр. 143, 1845. Отдельные наблюдения, равно как и зачатки его теории, ведут свое начало от прежнего времени; уже в своем „Treatise on light" 1828 г. он говорит: „Интересный пример такой поверхностной окраски, отличающейся от цвета тела в проходящем свете, встречается на зеленом плавиковом шпате из Эльстон Мора".

⁴ „On the decomposition and dispersion of light within solid and fluid bodies", „Edinb. Trans.", стр. III, 1846; „Pogg. Ann.", LXXIII, стр. 531.

140 ИССЛЕДОВАНИЯ СТОКСА

тонкий пучок сильного света, сконцентрированного чечевицей. *Опалесценцию* некоторых тел он отличает от флюоресценции, приписывая ее существованию внутри опалесцирующих тел тонких трещин и каналов.

Но еще большее значение получили рассматриваемые явления после исследований Стокса ¹, которые дали основание для совершенно новых умозаключений о природе самого света. Стокс построил свои наблюдения следующим образом. Из вертикальной щели в ставне солнечный свет пропускаться через три поставленные друг за другом мюнхенские призмы; благодаря этому в темной комнате на расстоянии нескольких футов от щели получался довольно чистый спектр. Затем по всей длине спектра, начиная с красной части его, перемещалась реактивная трубочка с исследуемым веществом; в промежутке от красного до фиолетового не замечалось ничего особенного, но лишь только реактивная трубочка вступала в область фиолетовых лучей, жидкость начинала сама светиться прозрачным голубым светом ², который по мере дальнейшего перемещения по спектру сначала еще усиливался, а потом постепенно исчезал. Это явление, равно как и найденное Беккерелем и Гершелем удлинение спектра на фосфоресцирующих веществах, Стокс охарактеризовал следующими проникновенными словами: *«внутренняя дисперсия дает физикам глаза, чтобы увидеть невидимые лучи»*. Лучи, которые однажды прошли через флюоресцирующее вещество и вызвали в нем флюоресценцию, не могут уже вызвать вторично флюоресценции в том же веществе. Для различных веществ флюоресценция, по наблюдениям Стокса, начинается в различных частях спектра; но *преломляемость падающего света никогда не бывает меньше преломляемости света флюоресценции*; однородный свет, падая на флюоресцирующее вещество, может дать сложный свет. Исследование флюоресцирующими веществами спектра *электрического света* показало, что *он содержит лучи еще большей преломляемости, чем солнечный свет, но что эти лучи почти полностью поглощаются стеклом, между тем как кварц их свободно пропускает* ³. Поэтому Стокс заказал себе призмы и чечевицы из *горного хрусталя* и исследовал позднее при помощи них спектры искры лейденской банки или вольтовой дуги. Отбрасывая полученные им таким образом спектры на пластинки уранового стекла или, еще лучше, на бумагу, пропитанную урановыми солями, он наблюдал удлиненные спектры, превосходившие в *шесть-семь раз* длину спектра видимого света ⁴. В начале своих работ Стокс применял для этих явлений название внутренней дисперсии, данное им Брюстером, но позднее, желая воздать должное воззрению Гершеля, он стал их называть *«дисперсион-*

¹ George Gabriel Stokes (1819—1903) — профессор физики в Кембридже. Президент Королевского общества.

² „Это было поистине удивительное зрелище, когда трубочка, будучи поставлена в область невидимых лучей, начинала мгновенно светиться; это была буквально видимая темнота. Коротко говоря, это явление содержало в себе нечто неземное" („Pogg. Ann.", дополнительный том IV, стр. 186).

³ „On the change of refrangibility of light", Mem. I, „Phil. Trans.", стр. 463. 1852, „Pogg. Ann.", дополнительный том IV, стр.177; Mem. II, „Phil. Trans.", стр. 385, 1853. „Pogg. Ann.", XCVI, стр. 522.

⁴ „Phil. Trans.", стр. 599, 1862. „Pogg. Ann.", CXXIII, стр. 30.

ТЕОРИЯ ФЛЮОРЕСЦЕНЦИИ СТОКСА 141

ным отражением». Однако и это название показалось ему недостаточно нейтральным. «Признаюсь, — говорит он, — это выражение мне не нравится. Всего лучше было бы, по-моему, назвать это явление *флюоресценцией*, от частицы fluog в плавиковом шпате (Fluogspar), подобно тому как слово опалесценция произвели от опала»¹. Это выражение пришло, и во второй своей работе по тому же вопросу Стокс окончательно принял этот термин. «В своей прежней статье, — говорит он там, — я предложил название флюоресценция для обозначения общих явлений, наблюдаемых в растворе сернокислого хинина и в других подобных ему веществах. Встретив в этом одобрение, я буду теперь постоянно применять это выражение вместо прежнего выражения — истинная внутренняя дисперсия², так как *оно является единственным выражением, не включающим в себя какой-либо теории*»³. Последнее было особенно важно для Стокса, так как он не мог согласиться с теоретическими воззрениями своих предшественников — Гершеля и Брюстера. По его мнению, причину этого явления следовало искать не в отражении или дисперсии как внутренней, так и поверхностной, *а в невидимом ультрафиолетовом свете, который во флюоресцирующих телах превращается в менее преломляемый видимый свет*. В самом деле, когда волны светового эфира падают на весомые массы, то колебания эфира сообщаются частицам этих масс, если только по своей величине и положению они способны приходить в подобные колебания. Но так как в данном случае движения передаются частицами более тонкими частицам более грубым, то следует ожидать, что этот переход должен быть связан с известным уменьшением скорости колебаний, а, следовательно, и числа колебаний. Так как, далее, с весомых частиц движения передаются эфиру без изменений, то описанное поглощение и излучение света весомыми массами приводит только к тому результату, что поглощенные волны света, теряя в скорости колебания, увеличиваются в своей длине. Таким образом, заключающиеся в пучке света ультрафиолетовые лучи превращаются некоторыми телами в менее преломляемый фиолетовый или голубой свет, и этот-то излучаемый телами видимый нами свет является светом флюоресценции. Уже в первой своей статье Стокс склоняется к мысли, что на основе волновой теории причину флюоресценции следует искать только в изменении преломляемости лучей: *«Внутренняя дисперсия подчиняется некоторому закону, который, по-видимому, является общим, а именно, что если при дисперсии преломляемость света изменяется, то это изменение всегда происходит в сторону понижения. Я исследовал кроме упомянутых еще много других веществ и нигде не встретил ни одного исключения»*⁴. Однако именно этот закон, в общем его виде, вызвал много возражений, хотя в остальной теории Стокса и была принята. Так, Эмсман в 1859 г.⁵ флюоресценции Стокса, названной им *положительной*, про-

¹ „Pogg. Ann.“, дополнительный том IV, стр. 205.

² Стокс различал *ложную* дисперсию (вызываемую частицами пыли в жидкости) и *истинную* (флюоресценцию).

³ „Pogg. Ann.“, XCVI, стр. 526.

⁴ „Pogg. Ann.“, дополнительный том IV, стр. 238.

⁵ „Marbach's physik. Lexikon“, 2. изд., VI, стр. 1081.

142 ВОЗРАЖЕНИЯ ПРОТИВ ЗАКОНА СТОКСА

тивопоставил *отрицательную* флюоресценцию, при которой преломляемость лучей должна усиливаться, а в 1866 г.¹ ему даже показалось, что он доказал на опыте существование подобной отрицательной флюоресценции. Акин² и Тиндаль³ тоже полагали, что им удалось наблюдать явления, которые можно было отнести к случаям отрицательной флюоресценции. Эти наблюдения касались случаев накаливания и свечения тел в фокусе вогнутых зеркал, на которые падали невидимые тепловые лучи. Первый назвал этот случай превращения тепловых лучей в световые *кальцесценцией*, а второй — *калорисценцией*. Однако К. Бон⁴ доказал, что эти случаи не могут служить примерами отрицательной флюоресценции, так как здесь нет непосредственного превращения лучей меньшей преломляемости в лучи большей преломляемости: ^лучение радиации более высокой преломляемости является только следствием повышения температуры, вызванного тепловыми лучами, а не непосредственным действием этих последних. Труднее было опровергнуть возражения Ломмеля против закона Стокса⁵. Ломмель в 1871 г. показал, что *красная краска магдала в свете натриевого пламени, излучающего почти однородные желтые лучи, дает спектр флюоресценции, который, распространяясь от желтого цвета к зеленому, заходит за линию D; он полагал, что в данном явлении он нашел искомый случай непосредственного превращения света меньшей преломляемости в свет большей преломляемости*. Хотя Гагенбах⁶, а вместе с ним и некоторые другие скоро высказались в том смысле, что и в данном случае нет основания допускать наличия подобного превращения и что распространение спектра флюоресценции за линию *D* объясняется здесь недостаточной чистотой света, неполной его однородностью,— однако Ломмель до сих пор остается при своем мнении и все пытается подкрепить его новыми доказательствами⁷.

Те физики, которые не приняли закона Стокса о превращении света при флюоресценции, должны были, конечно, объяснять это явление иначе, и действительно таких попыток было сделано не мало.

¹ „Pogg. Ann.“, CXXIX, стр. 352, 1866.

² „Philosophical Magazine“ (4), XXVIII, стр. 554, 1864.

³ Там же, стр. 329, 1864.

⁴ „Pogg. Ann.“, CXXX, стр. 367 и CXXXIII, стр. 165, 1867 и 1868.

⁵ „Pogg. Ann.“, CXLIII стр. 26, 1871. Eug. Lommel (родился 1837 г.) с 1868 г. профессор физики в Эрлангене. с 1886 г. — в Мюнхене.

⁶ „Pogg. Ann.“, CXLVI, стр. 65, 1872. юбил. том, стр. 303, 1874. Ed. Hagenbach (родился в 1833 г.) — профессор физики в Базеле.

⁷ Найдя еще несколько других случаев отклонения от закона Стокса, Ломмель в 1876 г. („Pogg. Ann.“, CLIX, стр. 514) говорил о двух различавшихся им в 1871 г. видах флюоресценции следующее: „В первом случае всякий однородный луч, способный вызвать флюоресценцию и по своей преломляемости лежащий в пределах спектра флюоресценции или в определенной области последнего, дает лучи не только большей и равной, но и меньшей длины волны, причем последние — постольку, поскольку они входят в соответствующую область. Во втором же случае каждый однородный луч света, способный вызвать флюоресценцию, возбуждает только те лучи спектра флюоресценции, которые имеют бо'льшую, чем он сам, или, по крайней мере, равную длину волны“ (стр. 535). Большинство флюоресцирующих тел дает только флюоресценцию второго рода; флюоресценцию первого рода дают магдала, хлорофилл и эозин; некоторые вещества дают оба рода флюоресценции.

ТЕОРИЯ ФЛЮОРЕСЦЕНЦИИ ЛОММЕЛЯ 143

Эйзенлор ¹ полагал, что подобно тому как из двух музыкальных тонов возникают комбинационные тоны, так из двух световых лучей различных цветов могут получаться *комбинационные цвета*, причем, конечно, как у тонов, частота колебаний должна быть меньшей, чем у слагаемых цветов. Таким образом свет флюоресценции мог бы получиться в результате сочетания ультрафиолетовых лучей с сине-фиолетовыми. Хотя Ломмель ² в 1862 г. и отверг эту гипотезу на том основании, что и однородный свет способен вызывать флюоресценцию, однако он полагал, что ее можно улучшить. По его мнению, свет флюоресценции тоже является комбинационным светом, но происшедшим не из различных цветов светового луча; *он получается в результате сочетания падающего на тело света со светом, излучаемым обратно телом в силу оптического резонанса*. По этому поводу Бон ³ отметил, что в таком случае и отрицательная флюоресценция представляется вполне возможной, больше того — даже необходимой, так как комбинацию цветов следует допустить не только по аналогии с *разностными*, но и с *суммовыми* гельмгольцевскими тонами. Впоследствии Ломмель ⁴ сам дальше развил свою теорию в соответствии со своими новыми наблюдениями. Он допустил, что падающие лучи света способны приводить в движение не только частицы, настроенные с ними в унисон, или; усиливать движение таких частиц, но *также возбуждать весомые молекулы, настроенные на октаву ниже или выше*. Возбужденные таким образом цвета флюоресценции, равные вообще по числу своих колебаний возбуждающему свету, представляют собою *флюоресценцию первого рода*. Однако в большинстве случаев эти первоначальные тона комбинируются с возбужденными одновременно более низкими октавами в *разностные тоны*, числа колебаний которых ниже, чем у падающего света. Эти комбинационные тоны представляют собою *флюоресценцию второго рода*. Ломмель признает также возможность возникновения *суммовых цветов*, но полагает, что они вследствие малой их интенсивности должны быть незаметны ⁵.

До настоящего времени этот спор между двумя конкурирующими гипотезами окончательно еще не разрешен. И в теории Стокса и в теории Эйзенлора-Ломмеля взаимодействие между движениями эфира и движениями весомых молекул создало столь шаткий момент, что ни одна из них не могла получить решающего перевеса над другой. Нельзя, однако, не признать, что и в этой трудной области волновая теория оказалась все-таки плодотворной, что применение к свету свойств известных волнообразных движений, как, например, звука, послужило источником новых исследований; следует затем обратить внимание и на то обстоятельство, что *уже с начала сороковых годов*

¹ „Pogg. Ann.“, XCIII, стр. 623, 1854.

² Там же, CXVII, стр. 642, 1862.

³ Там же, CXXX, стр. 391, 1867.

⁴ Там же, CXLIII, стр. 26, 1871.

⁵ В 1878 г. („Wied. Ann.“, III, стр. 251) Ломмель попытался обосновать свою теорию более глубоко на математической основе. Для объяснения поглощения света он допускает существование взаимодействия, аналогичного трению между частицами эфира и частицами весомай материи.

144 ГИПОТЕЗА ДОПЛЕРА

все больше развивалось и все чаще выступало на сцену понятие оптического резонанса. Совершенно своеобразное и поразительное по своим результатам применение метода умозаключения от акустических отношений к оптическим дал в 1842 г. Х. Доплер¹. Ему пришла в голову мысль, что *ощущение* волнообразного движения должно зависеть не только от длины его волны, но также *и от движений воспринимающего органа* и самого источника волнообразного движения; это обстоятельство должно иметь одинаковое значение как для звука, так и для света. Он применил эту идею прежде всего для объяснения *цветной окраски света звезд*. С приближением к нам светящегося тела желтый свет должен переходить в зеленый, голубой и фиолетовый, а с удалением — в оранжевый и красный. Поэтому все приближающиеся к нам или удаляющиеся от нас звезды, например, все *двойные звезды*, хотя сами по себе они, вероятно, белого цвета, должны казаться нам окрашенными, что в действительности и наблюдается. Бейс-Баллот² проверил теорию Доплера в акустическом отношении на трех железнодорожных станциях между Утрехтом и Маарсеном. На станциях духовым инструментом издавался определенный музыкальный тон, а ехавшие на локомотиве музыканты должны были отмечать его высоту. Эти опыты были произведены и в обратном направлении. В том и другом случае теория Доплера по отношению к *изменению высоты тона* оказалась правильной. Однако, принимая во внимание чрезвычайно большую скорость *света*, Бейс-Баллот считал скорость звезд и земли слишком незначительной, чтобы изменить белый свет звезд в цветной. Кроме того, непосредственные наблюдения над двойными и переменными звездами привели его, по его мнению, к результатам, несогласным с этой теорией; и, наконец, исходное положение Доплера, будто первоначальный свет всех звезд должен быть белым, он считал совершенно произвольным. Доплер пытался отстаивать свое мнение против Бейс-Баллота в целом ряде статей³; тем не менее, в то время почти все физики встали на сторону Бейс-Баллота и только позднее, после открытия спектрального анализа, в последнем увидели также средство для определения смещения цветов, вызываемого приближением или удалением источника света⁴.

¹ „Über das farbige Licht der Doppelsterne“, Prag 1842. Christian Doppler (1803 — 1853) — профессор математики в Праге, потом — в Хемнице и, наконец, в Вене.

² „Pogg. Ann.“, LXVI, стр. 321, 1845. Теорию Доплера подтвердил также и Скотт Руссель опытами на локомотиве, двигавшемся с большой скоростью — от 50 до 80 миль в час.

³ „Pogg. Ann.“, LXVIII, стр. 1; LXXXI, стр. 270; LXXXV, стр. 371.

⁴ Один только Б. Больцано (профессор религиозной философии в Праге) указал, что работа Доплера дает больше, чем обещает ее заглавие, будучи одинаково важной и для акустики и для оптики, равно как и для всего учения о волнообразном движении. Хотя он и не верит выводам исчислений Доплера, будто скорости движения звезды в 33 мили в секунду (к нам или от нас) достаточно для заметного изменения ее цвета, тем не менее, он заключает свою статью следующими словами: „Я ожидаю с уверенностью, что со временем ею (теорией Доплера) будут пользоваться для разрешения, на основании изменения цвета небесных тел, вопросов, движутся ли эти последние, куда и с какой скоростью они движутся, какие расстояния отделяют их от нас и

СПЕКТРАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ В. А. МИЛЛЕРА 145

Интересно, что подобное все более учащающееся применение в оптике акустических аналогий оставалось почти без влияния на воззрения о *связи между светлыми и темными линиями спектра*. Правда, у Брюстера, опубликовавшего в 1850 г. новую большую работу ¹ о спектральных линиях, это было еще понятно, так как он был противником волновой теории; однако и у других физиков этот вопрос не получил должного направления. В. А. Миллер в 1845 г. ² исследовал действие *окрашенных газов и паров* на проходящий через них свет, а также много различных *пламен, окрашенных металлическими солями*, и нашел *спектры поглощения и спектры солей* самого различного и характерного вида; тем не менее, связи между этими спектрами и зависимости их от химического состава соответствующих веществ он не установил и, судя по тону его работы, совершенно не пытался определить. «Мои наблюдения, — говорит он, — касаются, главным образом, двух вещей: действия окрашенных газов и паров на проходящий через них свет и спектров, даваемых различными пламенами. Прежде чем изложить постановку опытов, я вкратце приведу главные результаты, полученные мною по первому вопросу: 1) при применении бесцветных газов мне ни разу не удавалось найти новых линий...; 2) одни цвета еще не обуславливают появления линий...; 3) по цвету газа еще нельзя судить о положении линий...; 4) *как простые, так и сложные тела дают линии, а два простых тела, в отдельности не дающих линий, в соединении могут дать большое количество линий ...*; 5) *линии могут быть и в парах простых веществ, например в парах йода, между тем как в их соединениях никаких линий нет...*; 6) *иногда одни и те же линии появляются в различных ступенях окисления одного и того же вещества...*; 7) линии увеличиваются в числе и густоте при увеличении цветного слоя, проходимого светом, а также при повышении интенсивности его окраски в силу какой-либо причины...; 8) линии появляются как в поляризованном, так и в неполяризованном свете. Хотя я еще не производил соответствующих опытов, тем не менее, я нисколько не сомневаюсь в том, что эти линии (линии поглощения), подобно фраунгоферовым, указывают на отсутствие химического влияния, а равно и света» ³. Во второй части своей работы, посвященной *спектрам окрашенных пламен*, Миллер дает только описание спектров

друг от друга, равно как для разрешения многих других вопросов" („Pogg. Ann." LX, стр. 83). Сестини (астроном в Collegio Romano) приводит в пользу теории Доплера тот факт, что в области неба, куда движется наша планетная система, преобладают голубые, в противоположной области красные, а в средней полосе белые неподвижные звезды („Pogg. Ann." LXXXI, стр. 274)

¹ „Comptes rendus", XXX, стр. 578, „Pogg. Ann", LXXXI, стр. 471. Брюстер, заметивший у многих светлых линий (серы, азотнокислой соли стронция) совпадение с фраунгоферовыми линиями, дальше отмечает: „Я нисколько не сомневаюсь в том, что при сжигании различных солей или металлов должны наблюдаться совпадения подобных блестящих линий с другими главнейшими полосами обычного спектра" (стр. 581). Объяснения приведенного выше явления он не пытается давать.

² „Philosophical Magazine" (3), XXVII, стр. 81, 1845. LXIX, стр. 404, 1846 г.; „Pogg." Ann". William Allen Miller (1817—1870) — профессор химии в Лондоне.

³ „Pogg. Ann.", LXIX, стр. 405 — 407.

146 НАБЛЮДЕНИЯ СВАНА, УИТСТОНА, ДЕВИ, ДЕПРЕ. АНГСТРЕМА И ПЛЮКЕРА хлористой меди, борной кислоты, азотнокислого стронция, поваренной соли и др. и приходит к следующему выводу ¹: «В связи с соображениями о поглощающем действии атмосферы солнца небезынтересно будет отметить, что когда солнечный свет пропускается через пламя, дающее ясно выраженные черные линии ², то эти линии сохраняются и в составном спектре, если только солнечный свет не слишком силен по сравнению со светом цветного пламени. *Существуют, по-видимому, светящиеся атмосферы, в которых не только отсутствуют известные лучи, но которые еще оказывают положительное поглощающее действие на свет, идущий от другого источника* ³».

Девять лет спустя У. Сван в работе ⁴ «О призматических спектрах пламен углеводородистых соединений» более подробно изучил совпадение светлых и темных линий, но пришел скорее к отрицательным, чем положительным результатам. В конце своей работы он говорит по этому поводу: «*Первое из этих совпадений (натриевой линии с линией D) давно уже известно, так как оно было открыто еще Фраунгофером; подобные же любопытные совпадения были найдены сэром Дав. Брюстером для некоторых линий спектра „горящей селитры“ и соответствующих линий солнечного спектра. Из этих странных и многочисленных совпадений можно было бы заключить, что светлые линии спектров пламен совпадают с темными линиями солнечного спектра... Однако легко видеть, что наблюдаемые отклонения линий b_2 и γ_2 отличаются не меньше чем на 40", а это значительно превышает пределы возможных ошибок при наблюдении этих линий ... Поэтому совпадение этих линий представляется очень маловероятным*» ... «На основании данных, полученных путем одновременного наблюдения спектров солнечного света и маслородного газа, а также на основании результатов наблюдений, произведенных с помощью теодолита, я заключаю, что и остальные светлые линии углеводородного спектра совпадают не с темными линиями, а со светлыми местами солнечного спектра» ⁵. Более удачными оказались результаты, полученные Сваном по вопросу о зависимости светлых линий от элементов веществ, окрашивающих пламя. Он не только установил, что светлые линии почти всех углеводородов тождественны, но что почти всегда представленная во всех спектрах светлая линия D получается от паров натрия — элемента, следы кото-

¹ Там же, LXIX, стр. 416.

² Это относится преимущественно к спектру азотнокислого стронция, в красной и оранжевой особенно развитой части которого наблюдаются три резкие, темные линии. Миллер здесь, таким образом, ошибочно приписывает пламени как светлые, так и темные полосы спектра.

³ В этой статье Миллер впервые приводит *изображения* спектров цветных пламен, а именно хлористой меди, борной кислоты, азотнокислого стронция, поваренной соли и хлористого бария. По сравнению с нынешними их едва можно узнать. Соответствующие соли обычно растворялись в алкоголе применявшейся для этих наблюдений спиртовой лампы, но несколько раз были также введены в струю гремучего газа. Так называемая *бунзеновская горелка*, играющая теперь столь важную роль в спектральном анализе, была описана Бунзеном и Роскоэ лишь в 1857 г. в работе о фотохимических измерениях („Pogg. Ann.", С, стр. 84—86)

⁴ „Edinb. Trans.", XXI, стр. 411; „Pogg. Ann." С, стр. 306.

⁵ „Pogg. Ann.", С, стр. 329—330.

НАБЛЮД. СВАНА, УИТСТОНА, ДЕВИ, ДЕПРЕ, АНГСТРЕМА И ПЛЮКЕРА 147
рого распространены повсюду и которого достаточно взять всего в количестве $\frac{2}{100\ 000}$ грана, чтобы дать светлую полосу D в спектре пламени. Наряду со спектрами пламени был подвергнут исследованию и *спектр электрической искры*, преимущественно *световой дуги Дэви*. Уитстон в 1835 г. нашел ¹, что спектры электрических искр, проскакивающих между металлическими полюсами, сходны с солнечным спектром и подобно (последнему состоят из семи групп окрашенных линий, отделенных друг от друга темными промежутками, но для разных металлов эти линии настолько резко отличаются по своей окраске, расположению, а также по своему числу, что примененный металл можно легко узнать по его спектру. Фуко заметил в 1849 г. ², что *две светлые полюсы в спектре дуги Дэви всегда совпадают с двойной темной линией D солнечного спектра*. Дебре в 1850 г. ³ на основании своих опытов пришел к заключению, что светлые линии в спектре электрической Искры не *зависят* от силы тока. Ангстрем показал в 1855 г. ⁴, что *мимические соединения металлов дают те же линии, что и сами металлы*. Он считал только необходимым отметить, что в некоторых случаях отдельные линии в спектрах соединений отсутствовали, или же наблюдались только с трудом, и что в сплаве олова с цинком он наблюдал небольшое смещение линий из голубой части спектра в сторону фиолетовой ⁵. Но Плюкер в 1858 г. ⁶ по спектру электрической искры в гейслеровской трубке вполне точно определял газы, которыми трубка была наполнена. По его мнению, спектр аммиака образуется из наложения друг на друга спектров водорода и азота; спектр кислорода характеризуется двумя узкими блестящими полосами на границе спектра и в оранжевой части ⁷.

¹ Там же, XXXVI, стр. 148. ² „L'Institut", стр. 45, 1849.

³ „Comptes rendus", XXXI, стр. 419.

⁴ „Pogg. Ann.", XCIV, стр. 141.

⁵ Насколько Ангстрем был еще далек от правильного представления о постоянстве спектральных линий, видно из следующих его слов: „Однако прямой опыт показал, что линия D в электрическом спектре (спектры электрических искр при различных электродах в различных газах) не вполне совпадает с желтой линией, образующейся в пламени алкоголя или в наружной части пламени свечи, но лежит несколько ближе к красному цвету. Эта желтая линия совпадает с линией, общей всем металлам, лежащей влево от D и обозначенной мною буквою n („Pogg. Ann.", XCIV, стр. 148)". Всем металлам свойственна линия n ; также, по-видимому, всем им свойственна и лежащая в красной части спектра линия m , хотя вследствие малой ее яркости трудно точно определить ее положение" (стр. 150). Позднее Ангстрем (там же, CXVII, стр. 293, 1862) жаловался, что основоположники спектрального анализа недостаточно оценили его заслуги в данной области; мы, однако, склонны считать его претензию недостаточно обоснованной.

⁶ „Pogg. Ann.", CV, стр. 67. Плюкер здесь говорит: „Полагаю, что я первый определенно приписал световые явления, сопровождающие электрический разряд в длинных трубках с разреженным газом,— если отвлечься от особых явлений вблизи обоих электродов,— исключительно следам газа, оставшимся в трубках".

⁷ „Pogg. Ann.", CV, стр. 78.— Julius Plücker (1801—1868), до 1833 г. экстраординарный профессор в Бонне, потом преподаватель Берлинской гимназии Фридриха-Вильгельма, с 1834 г. профессор математики в Галле, с 1836 г. профессор математики в Бонне. Работал сначала почти исключительно в области геометрии,

148 ЗАКОН ПОГЛОЩЕНИЯ И ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕТА

Интересно, что раньше, чем постоянство спектральных линий было установлено, к объяснению темных фраунгоферовых линий, а, следовательно, и к раскрытию тайны спектрального анализа пришли совершенно неожиданно не с этой, а с другой стороны. Ангстрем, высказав в своей упомянутой выше работе 1855 г. мысль, что «тело в раскаленном состоянии должно излучать как раз все те лучи, которое оно при обыкновенной температуре поглощает» — мысль, требовавшую, конечно, еще уточнения и дальнейшей проработки. Однако пять лет спустя Бальфур Стюарт¹ высказал уже совершенно определенно тот самый закон об отношении между поглощением и излучением, который вскоре затея получил такую известность благодаря Кирхгофу: «The absorption of a plate equals its radiation and that for every description of heat» («Поглощение пластины равно ее излучению, и это имеет место для любого рода тепла»)². Однако из самых этих слов видно, что автор, имея в виду, прежде всего теплоту, не предчувствуя еще связи этого закона со спектральным анализом. Вообще, рассматривая все работы этого периода, нельзя не признать, что хотя в наблюдениях над спектром в то время не было недостатка и хотя приемы наблюдения были в общем удовлетворительны, тем не менее, несмотря на обилие материала, в указанных выше исследованиях явно еще не содержалось мысли о спектральном анализе. До сих пор работы касались еще чисто эмпирической стороны проблемы, простого наблюдения явлений, проблема же спектрального анализа могла быть разрешена не путем простого наблюдения, а только путем теоретической обработки наблюденного. *Те, кто в науке считают вполне достаточным или даже только возможным простое описание явлений, могут здесь на примере убедиться, как далеко можно уйти только с подобным описанием, без установления или хотя бы допущения причинной связи между явлениями.* Упомянутые до сих пор чисто оптические работы касались вопроса о поглощении света весомыми массами лишь постольку, поскольку поглощенный свет наблюдался опять-таки в виде света, хотя бы и в измененной форме. Однако со времени установления закона сохранения силы эту проблему приходилось ставить еще в более общем виде и исследовать также и те случаи превращения света, которые не приводили снова к световым явлениям. Эти исследования представляли особую сложность, так как отделять друг от друга действие световых и тепловых лучей было трудно или даже невозможно. Более доступным представлялся еще вопрос о *превращении световых движений в химические силы*, так как соответствующие явления были наиболее резко выражены³, а лучи света и тепла проявляли здесь, по-видимому, противо-

где проложил новые пути, которые, однако, не получили скорого признания; с конца сороковых годов он занялся исключительно исследованиями в области физики, где опять-таки с особым интересом предавался изысканию новых путей.

¹ „Edinb. Trans“, XXII, стр. 1 и 51, 1861. Эта работа датирована 1858 годом и вышла под следующим заглавием „An account of some Experiments on Radiant Heat involving an extension of Prevost's theory of Exchanges“. — Balfour Stewart (1828—1837) — профессор физики в Манчестере.

² Там же, стр. 13.

³ Открытие фотографии, по-видимому, значительно способствовало оживлению исследований в этой области.

ФОТОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ 149

ножные свойства. В самом деле, прежние исследователи химического действия света полагали, что подобное действие способны вызывать только наиболее преломляемые лучи, тогда как красные и желтые способны только уничтожить действие первых. Правда, Эд. Беккерель, сохраняя за наиболее преломляемыми лучами исключительную способность *начинать* химическое действие, полагал, что и все прочие лучи способны *поддерживать* однажды начавшееся химическое действие ¹; а Мозер считал все вообще лучи способными производить одни и те же химические действия и полагал, что они отличаются друг от друга лишь по степени действия. Однако новейшие исследователи в этой области, Физо, Фуко, Дрэпер и др., снова примкнули к точке зрения прежних физиков. Для объяснения этого разноречия Дрэпер обратил внимание на то обстоятельство, что в призматическом спектре *фиолетовый* конец значительно более растянут и, так сказать, сильнее разрежен, чем красный, и что это разрежение вообще затрудняет точное определение относительной активности различных частей спектра; поэтому он предложил применять для такого рода исследований *дифракционные спектры*. Затем, начиная с 1855 г., стали публиковаться результаты ряда широко поставленных опытов Бунзена и Роскоэ, которые, после неудач с хлорной водой ², нашли наиболее подходящий для этих целей объект исследований в смеси хлора и водорода, полученной электролитическим путем из соляной кислоты ³. Однако являются ли наблюдаемые химические действия результатом превращения света или же световые лучи только освобождают химические силы напряжения, заключающиеся в материи, и в какой мере освобождающую силу можно считать пропорциональной произведенному действию, — эти вопросы до сих пор еще почти не были поставлены в фотохимических исследованиях.

В заключение нам остается хотя бы только упомянуть о развитии оптики в совершенно ином направлении, сделавшем за этот период большой шаг вперед. До настоящего столетия *математическая оптика* имела в этой дисциплине преобладающее значение. Под влиянием этого направления наиболее характерною особенностью световых явлений считалось *прямолинейное распространение световых лучей*, и все оптические явления в материальном мире старались свести к изменениям этого прямолинейного хода. Ньютоновская теория истечения служила хорошим примером плодотворности такого представления. Однако под влиянием волновой теории и новейших воззрений в физике *причин этих изменений направлений стали все больше искать в телах и во взаимодействии между волнообразными колебаниями эфира и движениями весомых масс*. Таким образом, возникла *физическая оптика*, отдельные части которой мы только что рассмотрели. Однако и последняя не оказалась в состоянии объяснить всех наших световых ощущений. Это заставило обратить особое внимание на деятельность

¹ „Pogg. Ann.“. LXXVII, стр. 82.

² Там же, XCVI, стр. 373.

³ Там же, С стр. 43 и 481 и др. Согласно Бунзену и Роскоэ один только Дрэпер („Philosophical Magazine“ (3), XXIII, стр. 401, 1843) впервые до них применял смесь водорода и хлора для фотохимических измерений.

органа, воспринимающего свет, и на его влияние; таким образом, получила развитие еще и физиологическая оптика¹. Первые работы в этой области начались с пересмотра чисто математической теории цветов, вызвавшей уже ранее столь много возражений. Что при этом сказалось (вообще говоря, отрицаемое) общее влияние гетевского учения о цветах, в этом едва ли можно сомневаться, принимая во внимание характер отдельных тем. За это говорит и то обстоятельство, что наиболее плодотворный исследователь в данной области, Г. Гельмгольц², начал ряд своих исследований популярной лекцией «Об естественнонаучных работах Гете»³, в которой он подробно и с любовью занялся этим выстраданным детищем великого поэта. К сожалению, мы можем здесь лишь бегло указать на многие интересные работы в данной области. Плато⁴, Фехнер⁵, Брюке⁶ и другие с необычайным прилежанием и даже во вред своему здоровью⁷ исследовали цвета, которые Гете назвал физиологическими и которые теперь получили название субъективных. Причину последних нашли, во-первых, в том, что ощущение продолжается некоторое время и после прекращения внешнего раздражения, причем, однако, это время не одинаково для различных цветов, и, во-вторых, в некоторой особенности глаза, в силу которой при длительном цветном раздражении, ощущение глазом этого цвета постелено ослабевает и из нового внешнего цветного раздражения глаз воспринимает только цвета, дополнительные к прежнему. Плато в 1830 г. измерил продолжительность светового впечатления⁸ и нашел, что она зависит не только от силы света, как этого требовала теория, но также от его окраски. Эмсман в 1854 г.⁹ пришел к несколько расходящимся с Плато значениям, но принципиально его данные оказались вполне согласными с данными Плато.

¹ Разделение этой области представило большие трудности, главным образом потому, что, в конце концов, появился еще один новый претендент на участие в этом разделении, а именно философия, выдвинувшая требование философской или психологической оптики. Эти притязания философии опирались на учение Канта, согласно которому пространство есть чистое представление и всякое познание наряду с данными наших чувств опирается на чистые функции нашего разума как на элементы, организующие и объединяющие наше восприятие. Однако физиология в сознании достигнутых ею успехов не была склонна замкнуться в узкие границы. Впрочем, в эти дискуссии, которым наравне с другими многочисленными разногласиями между философией и естествознанием не предвидится скорого конца, мы здесь дальше входить не можем.

² Обширное сочинение Гельмгольца: „Physiologische Optik“ начало появляться с 1856 г. в качестве особого тома «Allg. Encyclopädie der Physik» G. Karsten'a.

³ Прочитана в 1853 г. в заседании Германского общества в Кенигсберге; перепечатана в его „Vorträge und Reden“, стр. 1, Braunschweig 1884.

⁴ Ряд статей в „Pogg. Ann.“ от XXXII до LXXX.

⁵ „Pogg. Ann.“, XLIV, стр. 221; XLV, стр. 227; L, стр. 194 и 427.

⁶ Там же, LXXXIV, стр. 418, 1851.

⁷ Плато и Фехнер в результате этих исследований потеряли зрение — первый на всю жизнь, второй временно. Брюке заканчивает свою статью следующими словами: „Если я на этом заканчиваю свои исследования, то это происходит только потому, что последствия продолжительного напряжения глаз не позволяют мне их продолжать“ („Pogg. Ann.“, LXXXIV, стр. 447).

⁸ „Pogg. Ann.“, XX, стр. 304.

⁹ Там же, XCI, стр. 611.

ИРРАДИАЦИЯ. АККОМОДАЦИЯ ГЛАЗА 151

Труднее было достигнуть единогласия по вопросу о существовании *иррадиации*. Баден Поуэль высказался в 1849 г.¹ против теории Плато о распространении светового раздражения на сетчатке за пределы изображения, считая иррадиацию не *субъективным*, а *объективным* явлением, вызываемым дифракцией, происходящей частью в глазу, а частью в оптических приборах, например в зрительных трубах и т. п. Он, а также Г. Велькер² в качестве довода против субъективности иррадиации указали на то обстоятельство, что ее можно наблюдать и на искусственном глазе и что ее можно всегда устранить при помощи линз.

Затем Г. Мейер³ указал на *сферическую аберрацию* как на причину иррадиации; другие считали ее следствием *неполной аккомодации* глаза. Гельмгольц показал, что *оба эти фактора*, последний в большей степени, чем первый, могут вызвать *круги рассеяния света* вокруг изображений, которые и дают явление иррадиации. Но так как Фолькман установил, что иррадиация бывает и при полной аккомодации глаза, то для нее пришлось искать третьей причины. По Гельмгольцу⁴ последняя заключается в замеченном уже Фраунгофером⁵ *неполном ахроматизме* глаза. Большинство физиологов и физиков присоединилось тогда к этому мнению, и допущение Плато о распространении ощущений за пределы изображения было оставлено как ненужное, хотя возможность этого явления и не была никем опровергнута.

Неменьшие трудности, чем при объяснении иррадиации, представились и при исследовании процессов, происходящих в глазу *при аккомодации*. Брюке в 1845 г. указал на четыре возможные причины аккомодации⁶: 1) удлинение радиуса кривизны роговой оболочки; 2.) изменение выпуклости поверхностей хрусталика; 3) перемещение последнего вперед и 4) удлинение глазного яблока вдоль продольной его оси. Он лично склонялся к принятию *последнего предположения* как наиболее вероятного. Вскоре, однако, Лангенбек и Гельмгольц⁷ установили, что действительной причиной аккомодации является *вторая* из упомянутых выше. Своеобразное явление различного *блеска* тел Довэ в 1851 г.⁸ объяснил различием яркости и цвета изображений, образующихся в обоих глазах от соответствующих предметов, и подтвердил свою теорию опытами со стереоскопом. *Невидимость инфракрасных и ультрафиолетовых лучей* Брюке пытался объяснить, вопреки существовавшему тогда мнению о нечувствительности сетчатки к этим

¹ „Rep. of the Brit. Assoc.“, 1849; Communications to the Sections, стр. 9. Bade Powell (1798—1860) — духовное лицо, профессор геометрии в Оксфорде.

² „Über Irradiation“, Giessen 1852.

³ „Pogg. Ann.“. LXXXIX, стр. 540. 1853.

⁴ „Physiolog. Optik“, стр. 321, Leipzig 1867.

⁵ „Gilbert's Ann.“, LVI, стр. 304, 1817.

⁶ „Fortschr. d. Physik“ I, стр. 199.

⁷ M. Langenbeck, Klinische Beiträge, Göttingen 1849. Helmholtz: „Über eine bisher unbekannte Veränderung am menschlichen Auge bei veränderter Accommodation“, „Monatsber. d. Berl. Akad.“ 1853, стр. 137; „Über die Accommodation des Auges“, „Gräfe's Archiv f. Ophthalmologie“, II, стр. 1, 1856; см. также „Wissensch. Abhandlungen“, II, стр. 280 и 283.

⁸ „Pogg. Ann.“ LXXXIII, стр. 183.

152 ШКАЛА ЦВЕТОВ. ЦВЕТА МУТНЫХ СРЕД

лучам, поглощением их прозрачными средами глаза ¹. Вместе с Карстеном и Кноблаухом он доказал это поглощение прямыми опытами над бычачьими глазами ². Однако неопределимое значение в деле изучения глаза, и в особенности сетчатки, как в здоровом, так и в больном состоянии, а, следовательно, и для развития офтальмологии, имело изобретение Гельмгольцем *глазного зеркала* в 1851 г. ³.

Любопытное *обогащение шкалы цветов*, к которому нельзя было прийти обыкновенным исследованием солнечного спектра, было сделано Брюке в 1848 г. ⁴. Он обратил внимание, что в солнечном свете нельзя найти двух определенных цветов, *коричневого* и *серо-лавандового* (замеченного уже Гершелем), но что их легко воспроизвести при помощи поляризационного аппарата. Он расколол гипсовые пластинки террасообразно и положил их под поляризационный микроскоп. Тогда при параллельных николях, начиная с наиболее тонкого слоя, пластинки выглядели сначала бесцветными, затем серо-лавандовыми, фиолетовыми и т. д.; при скрещенных же николях на месте серо-лавандового цвета появился коричневый. *Таким образом коричневый цвет менее преломляем, чем красный, а серо-лавандовый сильнее преломляем, чем фиолетовый.* Позднее Листинг ⁵ установил, что серо-лавандовому цвету соответствует вдвое большее число колебаний по сравнению с коричневым и что, следовательно, воспринимаемые глазом колебания света составляют как раз целую октаву.

Вопрос о *цветах мутных сред*, игравший столь важную роль в учении Гете, был снова исследован Брюке ⁶, который в общем подтвердил наблюдения великого поэта. Мутную среду Брюке называет смесь двух или нескольких веществ различной преломляемости, в которой частицы одного из смешиваемых тел настолько малы, что они в отдельности невидимы, а заметны лишь потому, что они уменьшают прозрачность. Подобные мутные среды он получал, пуская в воду каплями спиртовой раствор мастики. Из наблюдений таких смесей он установил, *что мутные среды — при отражении света — сильнее поглощают лучи меньшей преломляемости* ⁷, *а в проходящем свете имеет место обратное явление, вследствие чего, — как это показал Гете, — на темном фоне мутные среды должны казаться голубыми, а на светлом фоне, наоборот, красными или желтыми.* В свете, отраженном мутными средами, нашли, как и следовало ожидать, *своеобразные поляризацион-*

¹ Там же, LXV, стр. 593, 1845.

² Там же, XIX, стр. 549, 1816..

³ „Beschreibung eines Augenspiegels zur Untersuchung der Netzhaut im lebenden Auge“, Berlin 1851; напечатано также в „Wissensch. Abhandlungen“. II, стр. 229.

⁴ „Pogg. Ann.“, LXXIV, стр. 461.

⁵ „Pogg. Ann“, CXXXI, стр. 564, 1867.

⁶ „Über die Farben, welche trübe Medien im auffallenden und durchfallenden Lichte zeigen“, Sitzungsber. der Wiener Akademie“, IX, стр. 530; „Pogg. Ann.“, LXXXVIII, стр. 363. 1853. Ernst Wilhelm Brücke (1819—1891) — с 1849 г. профессор физиологии в Вене.

⁷ Согласно френелевской формуле отражения света для прозрачных тел отражение возрастает с преломляемостью. Хотя при единичном отражении перевес на стороне сильнее преломляемого света ничтожен, но при многократном — как это бывает в мутных средах — он становится значительным.

ЦВЕТ УТРЕННЕЙ И ВЕЧЕРНЕЙ ЗАРИ 153

ные явления. А именно, луч такого света, если на него смотреть перпендикулярно к его направлению, оказывается вполне поляризованным, причем плоскость поляризации совпадает с плоскостью отражения. Эти поляризационные явления по своему характеру совершенно совпадали с теми явлениями, которые уже с давнего времени наблюдали на дневном свете, диффузно отраженном атмосферой. Впервые на эту частичную поляризацию дневного света обратил внимание Араго¹; затем Бабине² и в особенности Брюстер³ последовали ее дальше. Араго, равно как и Брюстер, полагал, что поляризация происходит вследствие прямого отражения света от частиц воздуха. Брюке же полагал, что это отражение происходит от посторонних частиц, взвешенных в воздухе, и что голубой цвет атмосферы, равно как цвет утренней и вечерней зари, следует отнести за счет цветов мутных сред⁴. Незадолго до Брюке Клаузиус дал совершенно иное объяснение голубой окраски воздуха⁵. И, по его мнению, свет атмосферы, несомненно, является отраженным, но причиной отражения он считал лишь *мелкие пузырьки пара*, «так как только они могут пропускать свет атмосферы без изменения». Если оболочки пузырьков очень тонки, то вследствие интерференции они должны давать голубую окраску. Когда пузырьки утолщаются, одновременно всегда образуются новые мелкие пузырьки и белый свет первых будет лишь ослаблять голубой свет последних. В проходящем же свете мелкие пузырьки должны окрашиваться в дополнительные цвета к голубому, т. е. они должны казаться красными,— во всяком случае, когда свет проходит через достаточно толстый слой этих пузырьков. Вследствие той же причины при высоком стоянии солнца свет его должен быть белым, а на горизонте — красным или желтым. Это объяснение Клаузиуса вызвало много возражений. Помимо сходства указанных явлений с явлениями, наблюдаемыми на мутных средах, для теории Клаузиуса оказалось неблагоприятным допущение пузырьков пара, существование которых все более оспаривалось. *Возникновение подобных пузырьков пара представлялось физикам этого периода еще более трудно объяснимым, чем даже голубой цвет неба*, тем более что повторные тщательные микроскопические исследования над конденсированными атмосферными осадками никогда не давали результатов, благоприятных для последней гипотезы⁶.

¹ „Pogg. Ann.“, XXXII, стр. 126, 1834.

² „Comptes rendus“, XI, стр. 618, 1840; „Pogg. Ann.“, LI, стр. 562.

³ „Pogg. Ann.“, LXVI, стр. 456 и XLVII, стр. 592. 1845 и 1846.

⁴ В приведенной статье Брюке говорит о цветах мутных сред следующее: „Применение всего того, что здесь было сказано вообще о мутных средах, к цветовым явлениям в нашей атмосфере настолько просто, что едва ли мне нужно на этом останавливаться. Легко понять, почему цвет утренней и вечерней зари не является дополнительным к небесно-голубому, но содержит гораздо больше красного, чем дополнительный... что у нас нет основания полагать, что свет солнца сам по себе является желтым, но что желтая окраска происходит от атмосферы... что луна, когда стоит высоко на небе, кажется нам белее, чем на горизонте, так как между нею и нами в первом случае имеется более тонкий слой мутной среды, чем во втором“ („Pogg. Ann.“, LXXXVIII, стр. 379).

⁵ „Pogg. Ann.“, LXXVI, стр. 161 и 188, 1849.

⁶ *Работа Клаузиуса снова оживила старый спор о присутствии пузырьков пара в атмосфере.* Ральяр в 1852 г. („Cosmos“), 1, стр. 610, 1852) выска-

154 ЦВЕТ НЕБА И ВОДЫ

В последнее время Гагенбах ¹ высказал мысль, что внутреннее рассеяние света в атмосфере является отражением его от слоев воздуха неодинаковой плотности, и ныне склоняются к мысли, что и это отражение действительно играет роль в деле образования цветов атмосферы. Однако этим дискуссия по данному вопросу не ограничилась и попытки новых объяснений этого явления продолжают и до сих пор. Никольс считает небесную голубизну субъективным явлением, вызываемым более быстрым утомлением сетчатки по отношению к лучам большей преломляемости по мере усиления света. Фон-Лоренц тоже считает это явление субъективным, но вызываемым одновременным восприятием темного фона небесного свода и белого света, отраженного от пыльных частичек, находящихся в атмосфере. По Лаллеману голубой цвет неба, по крайней мере, частично, является цветом флюоресценции, вызванной поглощением ультрафиолетовых лучей атмосферой; Шаппюи же утверждает, что часть голубого цвета вызывается присутствием в воздухе озона.

Всем этим попыткам объяснения голубого цвета неба соответствовали исследования над *цветом воды*. Подобно тому, как по началу атмосферному воздуху приписывали в качестве его естественной окраски весьма слабый голубой цвет, так и воду считали окрашенной в слабый голубой цвет и этим объясняли ее зеленую окраску. Но затем, когда в воде начали наблюдать такие же явления *внутренней диффузии* света, как и в атмосфере, тогда и цвет водных масс стали тоже объяснять внутренней диффузией. Однако по данному вопросу между различными мнениями имеется еще меньше согласия, чем даже в приведенном выше случае ².

зал мысль, что в пользу их существования говорит также мало естественнонаучных оснований, как мало самые эти пузырьки нужны для объяснения естественных явлений. Р. Филлипс („Philosophical Magazine" (4), V, стр. 28, 1853), напомнив, что жидкие пузырьки стремятся сжаться с силою, которая при равной толщине стенок обратно пропорциональна их диаметрам, заявил, что пузырьки пара, если бы они когда-нибудь и возникли, сжали бы заключенный в них воздух так сильно, что он должен был бы уйти из них в силу некоторого рода эндосмоса. Клаузиус на это возразил, что пленки этих пузырьков должны быть очень тонкими и потому должны обладать очень незначительным напряжением и что эти пузырьки после их разрушения должны очень легко вновь образовываться. Если Уэллер („Phil. Trans.", стр. 28, 1847) под микроскопом не наблюдал распада или разрыва пузырьков, то это можно объяснить и незначительным размером получавшихся при этом частиц. Возражая Брюке, Клаузиус указал, что в зените, где голубой цвет наиболее интенсивен, преобладает все-таки единожды отраженный голубой цвет и что массивные шарики жидкости не могут давать цветов тонких пластинок (Брюке привел это соображение в качестве второго момента для объяснения цветов в атмосфере) („Pogg. Ann.", LXXXVIII, стр. 543, 1853). Наконец, Кисслинг (преподаватель гимназии в Гамбурге) привел еще один весьма убедительный довод против теории пузырьков. Если образовать искусственный туман в сосуде и затем пропустить через него лучи света таким образом, чтобы получились дифракционные кольца, то в случае, если бы частицы воды были пузырьками, кольца должны были бы при увеличении давления расширяться а при уменьшении давления — сжиматься. Между тем в действительности радиусы колец остаются без изменения {Verdet-Exner, Wellentheorie des Lichtes, II, стр. 407).

¹ „Pogg. Ann.", CXLVIII, стр. 77, 1873.

² W. Spring („Bull. Ac. Roy. Belgique", XII, стр. 814, 1886; „Beiblätter zu Wie-

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА (приблизительно от 1840 до 1860 г.). В области *теории электричества* физики в сороковых годах нашего столетия очутились в тяжелом положении. Оптика и учение о теплоте в это время уже отказались от особых основных материй и сошлись на едином эфире как наитончайшей и наиболее упругой материи, пронизывающей все прочие вещества без заметного сопротивления и только потому невесомой. В электричестве же и в магнетизме все еще оставались особые невесомые электрические жидкости, а порою и магнитные, роль которых было трудно понять и трудно ограничить. Представляют ли собою эти жидкости действительно особые вещества, отличные от светового и теплового эфира, или же электрические и магнитные явления следует рассматривать лишь как особый вид действия того же эфира? Этот вопрос требовал уже не простого утверждения или отрицания, а фактического доказательства, что эти явления действительно могут быть выведены из особых движений эфира. Поэтому большинство физиков, может быть, и отвечало на этот вопрос, в положительном смысле молча, про себя ¹, но лишь немногие попытались открыто обосновать эту точку зрения.

И, действительно, немногочисленные предпринятые в это время попытки перенести *волновую теорию* на электричество обещали очень мало успеха ², а попытки некоторых физиков открыть в электрических явлениях *надежные признаки волнообразных движений* привели только к *отрицательным результатам*. Так, Вартман в 1845 г. тщетно пытался ³ открыть в электричестве явления *интерференции*, а в следующем году с таким же отрицательным результатом работал де-Гальда ⁴, пытавшийся открыть в магнетизме *отражение, преломление* или *диффузию*. Поэтому даже и те физики, которые всегда интересуются общей связью явлений, оставив пока в стороне вопрос о сущности того движения, которое мы называем электричеством, пытались лишь выработать такое воззрение, которое прямо не требовало бы допущения особых электрических жидкостей. Эта группа ученых, с самим Фарадеем во главе, оставив *дуалистическую* теорию электричества, считавшуюся

dem. Ann.", XI, стр. 822) подтверждает новыми опытами, что естественный цвет воды голубой, а все прочие окраски являются цветами мутных сред, происходящими вследствие присутствия в воде твердых частиц.

¹ Очень интересно в этом отношении одно замечание Фехнера („Pogg. Ann.", LXIV, стр. 342, 1845): „Следует отметить, что то, что до сих пор определялось как скорость электричества, в действительности не является скоростью его частиц, а скоростью распространения их волнообразного движения. На это различие, обратившее на себя до сих пор очень мало внимания, но вполне заслуживающее его, впервые, насколько мне известно, обратил внимание В. Вебер”.

² Сравни А. J. Maas, „Bull. Ac. Roy. Belg." XIV, 1847; W. A. Norton, „Silliman's Journ.", IV, стр. 1 и 207, 1847.

³ „Comptes rendus", XX, стр. 1803, 1845 — Джон Мак Грегор („Die Fortschr. d. Physik im Jahre 1847," стр. 468) приводит четыре основания, в силу которых представляется невероятным, чтобы на электричестве когда-нибудь были открыты явления интерференции: 1) проводники электричества неоднородны; 2) токи неодновременно протекают по своим проводам; 3) не существует совершенно постоянных электрических токов; 4) у нас нет органа чувств для непосредственного восприятия интерференции электрических явлений.

⁴ „Comptes rendus", XXII, стр. 873, 1846.

156 ЗАКОН ОМА

столь долгое время бесспорной, вернулась к теории *единой* жидкости, которую можно было без особого труда отождествить с эфиром. Само собою понятно, что это воззрение встретило сочувствие прежде всего в Англии, среди соотечественников Фарадея ¹. Но во *Франции* и *Германии* против него возражали, указывая, что при современном состоянии знания о строении материи подобное воззрение еще не имеет *реального значения*, являясь в то же время *значительно менее удобным и плодотворным* для *математической разработки* электрических явлений, чем общепризнанная дуалистическая теория. Поэтому ограничились тем, что старое воззрение стали рассматривать только как полезную вспомогательную гипотезу, не претендующую на объективную действительность, и сохранили ее в силе без дальнейших изменений. *Большим успехом* сопровождалось изучение *количественной стороны* электрических явлений и именно *этими достижениями, начавшими особенно быстро накапливаться с сороковых годов, в значительной мере определились поразительные успехи современной электротехники*. Правда, в начале этого периода, когда закон Ома начал получать все большее признание, были сделаны попытки, преимущественно с французской стороны, оспорить его общность и точность. Так, Мариё Дави в 1846 г. ² заявил: «Итак, следует остерегаться приписывать законам Ома общность, которой они не имеют. У меня имеются, может быть, основания сомневаться в их точности даже в применении к термоэлектрическим токам; что же касается простых гидроэлектрических цепей. то они значительно уклоняются от этих законов». Соответственно этому и Дебре в 1852 г. заявил ³, что закон Ома отнюдь не представляет собою точного выражения явлений, а Секки ⁴ согласился с ним в отношении тех случаев, когда в цепь введены большие сопротивления. Однако Муаньо, помещая статью Дебре в своем журнале «Cosmos», отметил, что он лично совершенно не согласен со школой, которая ставит себе задачей доказывать неполное совпадение теоретически доказанных законов с практикой и пытается заменить эти законы набором отдельных наблюдений и эмпирических формул. Еще резче выразился в своем отзыве об этих работах Беетц ⁵: «Подобное напоминание особенно уместно в парижском журнале, так как «Comptes rendus» Парижской академии наук больше всех других журналов отличаются тем, что обременяют науку подобными исследованиями, не приводящими ни к каким выводам и физическим законам». Между тем

¹ Слогетт („Philosophical Magazine", XXVIII. стр. 443, 1846) и Смит (там же. XXXIX, стр. 404, 1816) приняли вновь теорию Франклина в ее первоначальном виде; Стивенсон (там же, XXIX, стр. 405) счел необходимым видоизменить ее в том направлении, что только проводники при избытке электрической жидкости являются положительно наэлектризованными, а непроводники при том же условии — наэлектризованными отрицательно.

² „Comptes rendus", XXXIII, стр. 602 „Il faut se garder d'accorder aux lois de Ohm une généralité qu'elles il'ont pas. J'ai peut-être lieu de douter de leur exactitude, même pour les piles thermo-électriques. Quant aux piles hydro-électriques simples, elles s'en écartent considérablement".

³ „Comptes rendus" XXXIV, стр. 781; „Cosmos", I, стр. 186.

⁴ „Cosmos", I, стр. 329; „Fortschr. d. Physik im Jahre 1852" стр. 477.

⁵ „Die Fortschr. d. Physik". VIII, стр. 477.

ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ЗАКОНА ОМА 157

в 1847¹ и в 1848 гг.² Кольрауш при помощи устроенного им электрометра измерил электрическое напряжение на полюсах разомкнутой гальванической батареи и *полностью подтвердил предпосылки Ома относительно этих напряжений. После этого отпали всякие сомнения в действительности закона Ома.* Г. Кирхгоф еще в 1847 г. уверенно положил закон Ома в основание своих знаменитых работ о *разветвлении тока*; в 1849 г.³ он дал более полное обоснование своего закона; при этом он не исходил подобно Ому из положения, что напряжение в элементе тока пропорционально плотности массы электричества в нем, а определил это напряжение с помощью *потенциала электричества* в соответствующем месте. Таким образом, Кирхгоф стал одним из первых физиков, которые признали важное значение понятия электрического потенциала, позволяющего исключить проблематическое понятие плотности электрической массы, и стали его применять соответствующим образом. Гельмгольц, в своей работе 1851 г.⁴, еще более *расширил* область применения закона Ома. Он показал, что этот закон имеет силу не только для постоянных токов, в которых выравнивание силы тока происходит по всей длине проводника, но что видоизмененное выражение этого закона может быть применено и к индуцированным токам, вызванным колебаниями тока, и что с увеличением периода это выражение асимптотически приближается к закону Ома. В конце концов, Комиссия британской ассоциации⁵ в 1876 г. еще раз подтвердила этот достаточно старый, много раз уже проверенный закон. Проблема *разветвления тока*, как мы уже частью указали раньше, была разработана для некоторых отдельных случаев Омом, Пулье, Уитстоном, Поггендорфом и В. Вебером⁶. Однако только Кирхгоф поставил и разрешил эту задачу в столь общем виде, что все последующие работы основывались на его решении. Оба закона, в которых содержится разрешение всех проблем разветвления тока, он дал еще в 1845 г., будучи студентом 21 года, в прибавлении к своей работе «Über den Durchgang eines Stromes durch eine Ebene, insbesondere eine kreisförmige» («О прохождении тока через плоскость, в частности — ограниченную окружностью»)⁷. Эти законы гласят: «Если через

¹ „Pogg. Ann.", LXXV. стр. 220.

² Там же. LXXVIII стр. 1.

³ „Pogg. Ann.", LXXVIII. стр. 506; „Gesamm. Abhandl.", стр. 49. Leipzig 1882.

⁴ „Über die Dauer und den Verlauf der durch Strömschwankungen inducirten elektrischen Ströme, („Pogg. Ann.", LXXXIII, стр. 505; „Wissenschaftl. Abhandlungen", стр. 429, Leipzig 1882.

⁵ „Rep. of the Brit. Assoc", 1876, стр.36; „Rep. of the Committee... for testing experimentally Ohm's Law".

⁶ Уитстон („Pogg. Ann.", LXII, стр. 499, 1841) занимался этой проблемой для теоретического обоснования устроенного им прибора, так называемого „уитстоновского мостика", который должен был служить для сравнения сопротивлений. Поггендорф („Pogg. Ann.". LXVII, стр. 273) дал формулы для применения этого прибора и экспериментально проверил их правильность совместно с В. Вебером.

⁷ „Pogg. Ann.", LXIV, стр. 497. „Gesamm. Abhandl.", стр. 1. Leipzig 1882. Gustav Robert Kirchhoff (родился 12 марта 1824 г. в Кенигсберге) — в 1847 г. приват доцент в Берлине; в 1850 г. экстраординарный профессор в Бреславле; в 1854 г. ординарный профессор физики в Гейдельберге; в 1874 г. профессор физики в Бер-

158 ЗАКОНЫ РАЗВЕТВЛЕНИЯ ТОКА

систему проводов, связанных между собою произвольным образом, проходят гальванические токи, то

1) в случае, если провода 1, 2, ..., μ сходятся в одной точке,

$$I_1 + I_2 + \dots + I_\mu = 0,$$

где I_1, I_2, \dots обозначают силы токов, проходящих по соответствующим проводам, причем все токи, направленные к упомянутой точке, являются положительными;

2) в случае, если провода 1, 2, ..., ν образуют замкнутую фигуру,

равно сумме всех электродвижущих сил, образующихся на пути 1, 2, ..., ν , где $\omega_1, \omega_2, \dots$ обозначают сопротивления проводов, I_1, I_2, \dots — силы протекающих по ним токов, причем токи, текущие в одном направлении, считаются положительными»¹. *Подробный вывод этих законов* последовал двумя годами позже², и *общее решение вопроса о разветвлении тока* было дано Кирхгофом в следующих словах: «Пусть t представляет собою общее число точек пересечения, т. е. точек встречи двух или большего числа проводов, и пусть $\mu = n - m + 1$ ³; тогда общим знаменателем для всех величин I будет сумма тех сочетаний из w_1, w_2, \dots, w_n по μ элементов в каждом, $w_{k_1}, w_{k_2}, \dots, w_{k_\mu}$, которые обладают тем свойством, что по удалении проволок k_1, k_2, \dots, k_μ не остается ни одной замкнутой фигуры; а числителем для I_λ является сумма сочетаний из w_1, w_2, \dots, w_n по $\mu - 1$ элементов в каждом, $w_{k_1}, w_{k_2}, \dots, w_{k_{\mu-1}}$, имеющих то свойство, что по удалении проводов $k_1, k_2, \dots, k_{\mu-1}$ остается замкнутая фигура, заключающая в себе λ проводов; каждое из этих сочетаний помножается на сумму электродвижущих сил, находящихся на соответствующей замкнутой фигуре. При этом электродвижущие силы следует считать положительными в том направлении, в котором I считается положительным»⁴. Доказательство своих законов Кирхгоф дал сначала для случая *линейных проводников*; в следующем году⁵ он распространил его на случай *телесных проводников*, приближающихся подобно проволокам к линейной форме, и таким образом распространил свое доказательство на все вообще формы проводников, применяемые при опытах. В то самое время, когда таким образом закладывалось прочное основание для математической разработки динамического электричества, без внимания не оставлялась и *математическая разработка статического электричества*, потому что именно здесь было где развер-

лине, где и умер 17 октября 1887 г. Сочинения его, помещенные первоначально в различных журналах, были затем изданы под заглавием „Gesammelte Abhandlungen“, Leipzig 1882. Его „Vorlesungen über mathemat. Physik: Mechanik“ выдержали с 1876 г. три издания.

¹ „Gesamm. Abhandl.“, стр. 15.

² „Pogg. Ann.“, LXXII, стр. 497, 1847. „Gesamm. Abhandl.“, стр. 22.

³ n есть общее число всех вообще связанных между собою проводов.

⁴ „Gesamm. Abh.“, стр. 23.

⁵ „Pogg. Ann.“, LXXV, стр. 189, 1848; „Gesamm. Abhandl.“, стр. 33.

КОНСТРУКЦИЯ ТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОМЕТРОВ 159

нуться математическому таланту. Так как согласно Кулону электрические жидкости принадлежат к тем веществам, которые действуют прямо пропорционально массам и обратно пропорционально квадратам расстояний, то знаменитое сочинение Гаусса «Allgemeine Lehrsätze in Beziehung auf die im verkehrten Verhältnisse des Quadrats der Entfernung wirkenden Anziehungs- und Abstossungskräfte» («Общие теоремы, касающиеся сил притяжения и отталкивания, действующих обратно пропорционально квадрату расстояния») ¹ оказалось применимым и ко всем проблемам статического электричества. По стопам Гаусса пошел Лежен-Дирихле, между тем как позднее Риман больше приблизился к направлению Грина. Затем эту разработку успешно продолжали в Германии Нейман, В. Вебер, Кирхгоф и особенно Клаузиус, а у англичан У. Томсон и Клерк Максвелл. *Систематические же сочинения*, охватывающие все достижения того времени в области математического учения об электричестве, дали Клаузиус ² и Клерк Максвелл ³. В работах по *статическому* электричеству главное внимание было уделено *распределению электрических масс на отдельных поверхностях и телах любой формы, а также взаимной электрической индукции между несколькими телами*. При этом, однако, математические трудности оказались столь большими, что упомянутые проблемы получили свое разрешение лишь для случаев простейших форм поверхностей и тел.

Для *измерения количеств статического электричества* до сороковых годов преимущественно применяли еще старые *электроскопы с золотыми листочками*; однако для проверки полученных теперь математических выводов они оказались слишком *неточными и ненадежными*. Поэтому внимание обратилось в сторону усовершенствования *крутильных весов Кулона*, которые до этого времени почти вышли из употребления, вследствие трудности обращения с ними и связанной с этим ненадежностью результатов. Главными дефектами этого прибора оказались недостаточная устойчивость начального положения коромысла и изменчивость кручения подвесной нити. Сноу Гаррисс ⁴ попробовал для устранения этих недостатков подвесить коромысло на двойной нити (бифилярно), но результаты не оправдали ожиданий. В это же время Пельтье ⁵ вернулся к мысли Швейггера ⁶ и заменил коромысло магнитной иглой, вращающейся на острие; однако и эта поправка не имела успеха. Более плодотворной оказалась конструкция Эрстеда, данная им в 1840 г. ⁷, заключавшаяся в сочетании идей Кулона и Швейггера. Он заменил шеллаковую палочку Кулона медной палочкой с припаянным к ней для подвешивания нити слабо намагниченным железным

¹ „Resultate aus den Beobachtungen des magnet. Ver. im Jahre 1839“; также „Sämmtl. Werke“, V, стр. 195.

² „Die mechanische Behandlung d. Elektrizität“, Braunschweig 1879.

³ „A treatise on electricity and Magnetism“, 2 изд., London 1881; перевод на немецкий язык:

„Lehrbuch der Elektrizität und Magnetismus“, Berlin 1863.

⁴ „Phil. Trans.“, стр. 417, 1836.

⁵ „Ann. de chim. et de phys.“ (2), LXII, стр. 422, 1836

⁶ См. первый выпуск этой части, стр. 192.

⁷ „Pogg. Ann.“, LIII, стр. 612.

160 КОНСТРУКЦИЯ ТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОМЕТРОВ

ушком, магнитность которого сообщала и медному коромыслу твердое начальное направление. Электричество подводилось не при помощи шара, а при посредстве двух медных рычажков, действовавших на оба конца коромысла. Дельман, применявший весы Кулона в их первоначальном «виде еще в 1840 г.¹ для своих наблюдений над атмосферным электричеством, изменил их в 1842 г.² следующим образом: коромыслом служила у него медная палочка, как у Эрстеда, а электричество подводилось, как у Пельтье, другою медною палочкой, которая была расположена под коромыслом параллельно последнему и, следовательно, действовала на него всей своей длиной. Для фиксирования начального положения коромысло (немагнитное) имело посредине изгиб, благодаря чему оно могло быть положено одной половиной на одну сторону приводящего стержня, а другой половиной — на другую часть его. Ромерсгаузен в 1846 г.³ заменил приводящую проволоку полоской; он расщепил ее посредине и выгнул обе половины в противоположном направлении, так что прямое коромысло можно было «положить в желобок. Наконец, Кольрауш в 1847 г. до известной степени завершил усовершенствование этого прибора⁴. Нить кокона он заменил стеклянною с большею силою кручения; для более удобного заряжения он от проводящей полоски провел стерженек наружу, пропустив его изолированно через дно прибора; воздух в последнем он осушал при помощи концентрированной серной кислоты; стеклянное дно и стеклянные боковые стенки прибора он заменил металлическими (во избежание их заряжения) и оставил стеклянною лишь крышку, через которую при помощи лупы он и наблюдал отклонения стержня. При помощи такого именно прибора Кольрауш провел указанную выше работу по проверке закона Ома, а также формул Кирхгофа для интенсивности разветвляющихся токов. Другой прибор, устроенный наподобие синус-буссоли и названный синус-электрометром, был изготовлен Кольраушем в 1853 г.⁵ Электрометр Рисса, примененный последним при его измерениях, начиная с 1855 г.⁶, очень мало отличался от только что указанного⁷.

¹ „Pogg. Ann.“, LIII, стр. 606, 1841.— Friedr. Dellmann (1805—1870) — преподаватель гимназии в Крейцнахе.

² „Über Oersted's „Elektrometer und ein neues Instrument der Art“ („Pogg. Ann.“, LV, стр. 301. 1842).

³ „Pogg. Ann.“, LXIX, стр. 71. Elard Romershausen (1784—1857) — пастор в Акене на Эльбе.

⁴ „Über das Dellmann'sche Elektrometer“ („Pogg. Ann.“, LXXII, стр. 353 и LXXIV, стр. 499). Rud. Kohlraush (1800—1858) — сначала преподаватель гимназии, а с 1857 г. ординарный профессор физики в Эрлангене,

⁵ „Pogg. Ann.“, LXXXVIII, стр. 497.

⁶ Там же, XCVI, стр. 513.

⁷ Мы не можем здесь входить в подробное описание новейших электрометров, значительно превышающих по своей тонкости и точности эти более старые приборы. Наиболее совершенными из них, к которым по существу сводятся и все остальные, являются *квadrантный электрометр* и *абсолютный электрометр У. Томсона*. Первый построен по принципу кулоновских весов; второй же в качестве измерительного прибора пользуется двумя параллельными противоположно наэлектризованными пластинками. Поскольку взаимное притяжение этих пластинок может быть прямо измерено при помощи противовеса, этот прибор дает возможность приводить действие электрических сил к абсолют-

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ СИЛЫ И ДВИЖЕНИЕ МАТЕРИИ 161

Электростатические измерения снова с полной достоверностью установили, частью непосредственно, частью путем проверки математических выводов, что электростатические и магнитные силы полностью и без изъятия подчиняются кулоновскому закону действия пропорционально массам и обратно пропорционально квадратам расстояний. Поэтому многие физики были склонны предполагать, что этот вид действия должен рассматриваться как основное свойство всех сил природы, и отсюда далее заключили, что по аналогии с явлениями тяготения и все прочие естественные явления следует объяснять непосредственным действием на расстоянии. Однако с таким строгим единством природы, при котором даже было трудно предусмотреть возможность разнородных действий сил природы, электродинамические явления были совершенно несовместимы. Ньютоновское воззрение не знало для сил никакой иной зависимости, как только от массы и расстояния тела; закон сложения скоростей, сообщаемых телу ускоряющей силой, и вообще закон сложения сил в том виде, как его точно сформулировал Ньютон, прямо отрицал зависимость действия сил от движения действующих тел, и ни один астроном никогда не вводил в свои исчисления зависимости тяготения от космических скоростей тяготеющих тел. Наоборот, электродинамические силы обязательно предполагали движение действующих масс и вполне явно зависели от этого движения, а именно, поскольку при покое электричества они вообще не возникали и по самому своему понятию требовали движения.

Ампера вопрос об этом противоречии не интересовал. Он установил понятие *силы*, или *интенсивности*, тока в качестве *основного понятия*, а от вывода этой силы из сил электрических жидкостей он совершенно воздержался. Приняв для электродинамического взаимодействия двух элементов тока прямую пропорциональность произведению их интенсивностей и обратную пропорциональность некоторой степени их расстояния, он с *внешней стороны* как будто еще сохранил *общую форму ньютоновского закона* притяжения; но его формула не могла быть *выведена* из основных свойств электричества, а только из *данных опыта*; ее чисто эмпирический характер выражался и в том, что она допускала применение только в своей специальной области, а именно, к случаю взаимодействия двух электрических токов. *Амперовская формула не соответствовала какому-либо общему воззрению на сущность нового случая действия сил, она была лишь выражением чисто эмпирического факта.* Это особенно подчеркнул В. Вебер при выводе *им нового основного электрического закона*, отметивший для обоснования своей мысли, что формула Ампера отнюдь не выявила себя в качестве истинного закона природы, каким, например, является закон тяготения; что она не оказалась плодотворным орудием при открытии новых явлений, а также при изучении родственных явлений, и что все

ной механической мере. Впервые идею подобного измерения дал еще Сноу Гарнс в своей статье, помещенной в „Phil. Trans.” в 1834 г., стр. 215. У. Томсон описал свои электрометры сначала в „Rep. of the Brit. Ass.”, 1855. „Trans. of the sect.”, стр. 22; затем подробно в „Rep. of the Brit. Ass.”, стр. 489, 1867. См. также *Wiedemann, Die Lehre von der Elektrizität*, I. стр. 165; *Cl. Maxwell, „Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus”*, I, стр. 343.

162 ОСНОВНОЙ ЗАКОН ВЕБЕРА

последующие успехи, например открытие индукции и ее законов, были достигнуты независимо от теории Ампера ¹. Вебер считает необходимым *оба закона действия*, приводившиеся до сих пор отдельно для *электростатических* и *электродинамических* действий, т. е. законы Кулона и Ампера, слить в *единый закон*, который охватил бы все электрические явления. Для этого, прежде всего, необходимо, *чтобы понятие об интенсивности тока было сведено к основным представлениям о взаимодействии электрических масс* ².

Динамическое действие тока может зависеть только от массы электричества, действующей в данной точке в течение известного времени; или *интенсивность тока должна быть пропорциональна количеству электричества, протекающего в единицу времени через каждое поперечное сечение провода*. Следовательно, если через e обозначить массу положительного электричества, заключенного в единице длины провода, а через u — его скорость, то интенсивность i положительного тока должна быть пропорциональна произведению eu , или должно иметь место равенство $i = aeu$, если a обозначает постоянное отношение между массой и ее дееспособностью. От такого определения *интенсивности тока* есть лишь *два пути к основному электродинамическому закону*: либо можно показать, каким образом из элементарных действий слагаются фактически наблюдаемые действия, либо можно формулу Ампера, выражающую общий результат действий, разложить на составные части, соответствующие элементарным действиям. Вебер использовал оба эти пути.

Если в формулу Ампера ³ для интенсивности тока вставить выражения Вебера, то получается:

$$\frac{ee' ds ds'}{r^2} a^2 uu' \left(\cos \epsilon - \frac{3}{2} \cos \vartheta \cos \vartheta_1 \right),$$

¹ „Elektrodynamische Maassbestimmungen“, I Abh., „Abhandl. bei Begründung der K. Sächs. Gesellsch. der Wissenschaft.“, 1816; извлечение в „Pogg. Ann.“, LXXIII, стр. 193, 1848.

² Попытку такого сведения сделал уже Фехнер в своей работе „Über die Verknüpfung von Faraday's Inductionerscheinungen mit den Ampere'schen elektrodynamischen Erscheinungen“ („Pogg. Ann.“, LXIV, стр. 337), и В. Вебер частично использовал исходные положения Фехнера. Последний в начале своей работы говорит: „До сих пор действие элементов тока друг на друга рассматривалось в целом, но, очевидно, разложению общего действия на действия отдельных составных частей... ничто не препятствует, поскольку такое разложение, с одной стороны, снова приводит к результату, полученному на опыте, а с другой стороны,— открывает путь к требуемой связи“ (стр. 338). Принципы этой связи заключаются в следующем: 1) *Каждое действие элемента тока можно рассматривать как составленное из действия некоторой положительной и равной ей по силе отрицательной частиц, которые одновременно пробегают один и тот же элемент пространства в противоположных направлениях*; 2) *соответственно такому сложению взаимодействие двух элементов тока может быть представлено на основе предположения, что однородные электричества действуют друг на друга притягательно, когда они движутся в одном и том же направлении или к общей вершине угла; разнородные же электричества — когда они движутся в противоположных направлениях или когда одно из них приближается к вершине общего угла, а другое от нее удаляется“* (стр. 338).

³ См. первый выпуск этой части, стр. 196.

ОСНОВНОЙ ЗАКОН ВЕБЕРА 163

или же

$$\frac{ee' ds ds'}{r^2} \alpha^2 uu' \left(\frac{1}{2} \frac{dr}{ds} \cdot \frac{dr}{ds'} - r \frac{d^2 r}{ds ds'} \right),$$

если, по Амперу, подставить dr/ds вместо $\cos\theta$, — dr/ds' вместо $\cos\theta_1$,

и

$$- r \frac{d^2 r}{ds ds'} - \frac{dr}{ds} \cdot \frac{dr}{ds'}$$

(вместо $\cos\epsilon$. Если, далее, принять, — а согласно дуалистической теории электричества это представляется необходимым, — что через каждый элемент проводника одновременно протекают в противоположных направлениях *два* одинаковых количества положительного и отрицательного электричества, то взаимодействие *двух* элементов тока сложится из *четырёх* элементарных действий, двух притяжений и двух отталкиваний; тогда приведенное выше выражение соответствует величине взаимного отталкивания двух положительных электричеств в обоих элементах тока. Для трех остальных действий мы можем вывести совершенно аналогичные формулы. Во всех этих формулах величины dr/ds , dr/ds' и т. д. могут быть исключены и заменены *скоростями*. В самом деле, если принять во внимание, что расстояния r зависят от положения элементов в цепи тока, т. е. от s , а, следовательно, и от времени t , то путем двукратного дифференцирования можно получить:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{dr}{ds} \frac{ds}{dt} + \frac{dr}{ds'} \frac{ds'}{dt}$$

и

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{d^2 r}{ds^2} \left(\frac{ds}{dt} \right)^2 + 2 \frac{d^2 r}{ds ds'} \cdot \frac{ds}{dt} \cdot \frac{ds'}{dt} + \frac{d^2 r}{ds'^2} \left(\frac{ds'}{dt} \right)^2,$$

или, если подставить u вместо ds/dt и u' вместо ds'/dt и возвести первую формулу в квадрат, то

$$2uu' \frac{dr}{ds} \frac{dr}{ds'} = \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 - u^2 \left(\frac{dr}{ds} \right)^2 - u'^2 \left(\frac{dr}{ds'} \right)^2,$$

и

$$2uu' \frac{d^2 r}{ds ds'} = \frac{d^2 r}{dt^2} - u^2 \frac{d^2 r}{ds^2} - u'^2 \frac{d^2 r}{ds'^2}.$$

Подставив эти значения в приведенную выше формулу электродинамического действия двух положительных элементов, составив соответствующие выражения для остальных трех действий и сложив эти

164 ОСНОВНОЙ ЗАКОН ВЕБЕРА

четыре выражения, мы получим для совокупного действия обоих элементов

$$-\frac{ee' ds ds'}{r^2} \frac{a^2}{16} \left[\left(\frac{dr_I}{dt} \right)^2 - \left(\frac{dr_{II}}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dr_{III}}{dt} \right)^2 - \left(\frac{dr_{IV}}{dt} \right)^2 - \right. \\ \left. - 2r \left(\frac{d^2 r_I}{dt^2} - \frac{d^2 r_{II}}{dt^2} + \frac{d^2 r_{III}}{dt^2} - \frac{d^2 r_{IV}}{dt^2} \right) \right],$$

причем следует лишь принять во внимание, что все dr/ds и d^2r/ds^2 , где ds суть элементы провода, должны быть равны между собою и что формула Ампера, выражающая совокупное действие, здесь применена и просуммирована четыре раза. С другой стороны, последняя формула может быть разложена на четыре части, которые все имеют следующий вид:

$$-\frac{ee' ds ds'}{r^2} \frac{a^2}{16} \left[\left(\frac{dr}{dt} \right)^2 - 2r \frac{d^2 r}{dt^2} \right],$$

и которые с переменной знаков e и e' переходят одна в другую. Каждая из них в отдельности обозначает элементарное действие четырех электричеств, протекающих по элементам тока, а приведенная выше формула представляет собою общий закон взаимодействия движущихся количеств электричества. Так как в это выражение уже не входят *интенсивности токов*, а только *количества электричества*, и так как оно представляет отдельно действия различных электричеств, то к нему легко присоединить выражение для статического действия электричеств. Тогда взаимное действие двух электрических масс eds и $e'ds'$, независимо от того, находится ли электричество в покое или в движении, выразится самым общим образом в следующем виде:

$$\frac{ee' ds ds'}{r^2} \left[1 - \frac{a^2}{16} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + \frac{a^2 r}{8} \cdot \frac{d^2 r}{dt^2} \right],$$

или, если через v обозначить относительную скорость обеих электрических масс, отнесенную к соединяющей их линии:

$$\frac{ee' ds ds'}{r^2} \left(1 - \frac{a^2}{16} v^2 + \frac{a^2 r}{8} \cdot \frac{dv}{dt} \right).$$

Таким образом, формула Ампера привела Вебера к тому выводу, что *взаимное действие электрических масс зависит не только от электрической материи как таковой, но также от состояния ее движения, от ее скорости и ускорения.*

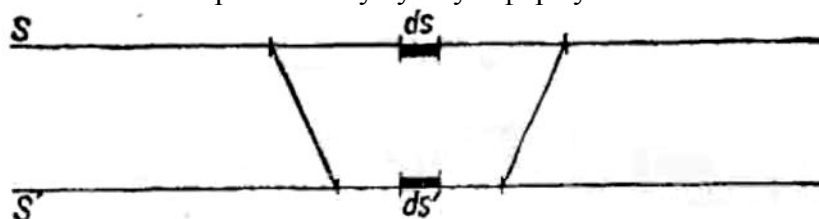
К такому же результату должны были привести, *независимо от теории Ампера*, и основные электродинамические опыты. Если представить себе два элемента положительного электричества e и e' протекающими по двум проводам, то их электростатическое отталкивание ee'/r^2 должно под влиянием движения измениться, ибо в противном случае

ОСНОВНОЙ ЗАКОН ВЕБЕРА 165

электродинамическое действие было бы вообще невозможно. Но тогда, во-первых, спрашивается, должно ли движение увеличивать или уменьшать силу. Рассмотрим два элемента, расположенных на одной прямой и движущиеся в одном и том же направлении. Здесь имеют место два отталкивания двух положительных или двух отрицательных электричеств и два притяжения разноименных электричеств. Но так как в рассматриваемом случае результирующей силой является *отталкивание*, и, следовательно, отталкивания элементов с меньшей относительной скоростью имеют перевес над притяжениями элементов с большей относительной скоростью, то скорость должна производить ослабление электростатических сил, ибо увеличения сил под влиянием скорости мы допустить не можем. Но *отталкивание* остается совершенно тем же, когда направление токов заменяется противоположным; следовательно, ослабление силы может зависеть не от нечетной, а лишь от *четной* степени скорости. Если сделать наиболее простое предположение, что ослабление силы пропорционально *квадрату* скорости, за что говорит и закон действия сил любых движущихся масс, то взаимное действие двух частиц тока можно будет выразить через $(ee'dsds'/r^2)(1-av^2)$, где a обозначает неопределенную пока еще постоянную, а v — *относительную* скорость обеих частиц. Однако это выражение еще недостаточно для электрических действий. Представим себе два параллельных и одинаково направленных пути тока S и S' (см. черт. 1) и пусть интенсивность тока, a , следовательно, и скорость в S будет больше, чем в S' . Представим себе, далее, два элемента тока ds и ds' , которые расположены прямо друг против друга; тогда здесь относительная скорость электричеств будет как раз равна нулю, до этого места она уменьшалась до нуля, а за ним она будет возрастать. Однако, так как и в этой точке, где относительная скорость равна нулю, электродинамическое действие все-таки существует, а именно, здесь имеет место притяжение, то, значит, все взаимодействие должно вообще зависеть не только от относительной скорости, но также от *ускорения*, причем влияние последнего должно быть противоположно влиянию скорости. Следовательно, к полученному нами выражению для электрической силы следует еще прибавить новый член, пропорциональный ускорению. В силу этого, если через b обозначить еще вторую неопределенную постоянную, взаимодействие двух движущихся масс электричества будет равно

$$\frac{ee' ds ds'}{r^2} \left(1 - av^2 + b \frac{dv}{dt} \right).$$

Если затем сложить соответствующие действия четырех количеств электричества в обоих токах и сравнить эту сумму с формулой Ам-



Черт. 1.

166 ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ ЗАКОН ГРАССМАНА

пера, то для действия двух движущихся количеств электричества снова получаем прежнее выражение

$$\frac{ee' ds ds'}{r^2} \left(1 - \frac{a^2}{16} v^2 - \frac{a^2 r}{8} \cdot \frac{dv}{dt} \right).$$

Постоянной a можно теперь придать *более* наглядный вид. Для этого представим себе, что токи имеют столь большую постоянную относительную скорость c , что электрическое взаимодействие их равно нулю; в таком случае должно быть:

$$1 - \frac{a^2}{16} \cdot c^2 = 0, \quad \text{или} \quad a = \frac{4}{c};$$

отсюда для взаимного действия масс электричества получается следующее выражение:

$$W = \frac{ee' ds ds'}{r^2} \left[1 - \frac{1}{c^2} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + \frac{2r}{c^2} \frac{d^2 r}{dt^2} \right].$$

Электрический закон силы Вебера был революционным актом первостепенной важности, чреватый великими последствиями. Со времени Ньютона все действия сил в последнем счете сводили к основным свойствам материи, которые в своих действиях были совершенно независимы от состояния движения. По Веберу же эти основные действия видоизменяются под влиянием движения, и не только скорость, но даже ускорение вызывает новые силы, независимые от свойств покоящейся материи. Таким образом, единое ньютоновское воззрение на силу, считавшееся прочно установленным для всей области физики, было снова поставлено под знак вопроса благодаря старому революционному элементу — электричеству, вследствие чего стал несомненным возврат к прежнему воззрению на движение как на действительное начало, порождающее силы. Однако у физиков того времени было еще мало склонности заниматься столь принципиальными вопросами в этой области, поэтому против новых воззрений на действие электрических сил в то время не было высказано особых возражений¹. С другой стороны, Веберу необходимо было разобраться в исследованиях других физиков, которые разрабатывали *гальваническую индукцию* с совершенно иной точки зрения, но в то же время пришли к выводам, вполне согласным с наблюдением.

Уже в 1845 г., т. е., таким образом, раньше упомянутых работ Вебера, появились два аналогичных исследования Г. Грассмана и Фр. Неймана, которые дали *теорию гальванической индукции*, не прибегая при этом к каким-либо новым предположениям о характере действия электрических сил.

¹ Характерно, что Крениг, один из основателей механической теории теплоты еще в 1864 г. („Pogg. Ann.“, СХХІІІ, стр. 305), высказался следующим образом: „Новейшая наука, насколько мне известно, придерживается исключительно той точки зрения, что все вообще силы следует рассматривать лишь как функции расстояний, а не как функции скоростей“.

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ ЗАКОН ГРАССМАНА 167

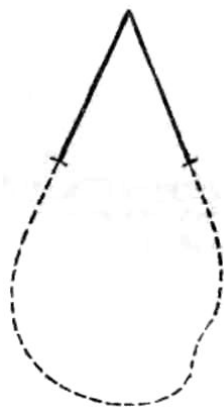
Грассман¹ признал электродинамический закон Ампера, безусловно, правильным по отношению к замкнутым токам, но считал применение его к частям или элементам тока невозможным; ибо, во-первых, этот закон предполагает, что направление взаимодействия между двумя бесконечно малыми частицами тока совпадает с прямой, соединяющей последние, и, во-вторых, из формулы для параллельных элементов тока получается уничтожение электродинамического действия во всех тех случаях, когда косинус угла между элементами и прямой, соединяющей их центры, равен $\sqrt{2/3}$. Поэтому при выводе нового электродинамического основного закона он исходил из действия *углов тока* на элемент, лежащий, хотя бы своим началом, в плоскости угла. Поскольку угловой ток можно считать замкнутым на бесконечно большом расстоянии (см. черт. 2), к нему применим закон Ампера. Если, далее, вместе с последним принять, что действие углового тока на элемент тока пропорционально проекции последнего на плоскость тока, то из формулы Ампера получается для этого действия следующее выражение:

$$W = \frac{ib_1}{r} \left(\operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} - \operatorname{ctg} \frac{\alpha'}{2} \right),$$

где i обозначает интенсивность углового тока, b_1 — проекцию интенсивности элемента тока, r — расстояние вершины угла от начальной точки элемента тока, α и α' — углы, образуемые этой линией со сторонами угла. Но в этом выражении каждая часть в отдельности, очевидно, представляет действие каждой стороны угла на элемент тока; поэтому действие луча, идущего из какой-либо точки в бесконечность, на элемент тока должно быть равно

$$W = \frac{ib_1}{r} \cdot \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}.$$

Наконец, если притягивающий элемент тока рассматривать как соединение двух бесконечно простирающихся лучей, обладающих направлением и интенсивностью этого элемента, причем по одному из них (положительному) ток протекает в том же направлении, что и по элементу, а по другому в противоположном, причем, далее, начальная точка элемента служит для одного началом, а для другого



Черт. 2.

¹ „Neue Theorie der Elektrodynamik“, „Pogg. Ann.“, LXIV, стр. 1, 1845. Hermann Günther Grassmann (1809—1877) — сын Юстуса Грассмана, изобретателя особого крана воздушного насоса, изучал теологию в Берлине; позднее, не прослушав математических лекций, держал экзамен на право преподавания математики и физики. С 1843 г. преподаватель в штеттинском реальном училище, затем в тамошней гимназии. В 1844 и 1862 г. опубликовал свои работы по общему учению о протяжении („Die Ausdehnungslehre“), получившие, однако, признание лишь с конца 70-х годов („Mathem. Ann.“, XIV, стр. 1).

168 ТЕОРИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ ИНДУКЦИИ НЕЙМАНА

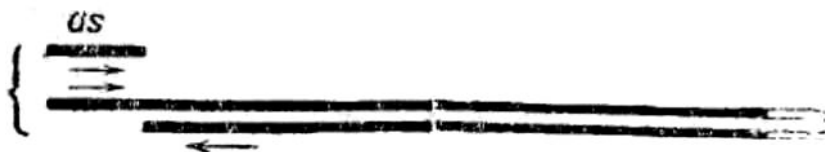
концом (см. черт. 3), то для выражения действия элемента тока a на другой элемент b ,

$$W = \frac{ab_1}{r} \sin \alpha,$$

удаленный от него на расстояние r , легко получается

где b_1 , обозначает нормальную проекцию b на плоскость, проведенную через a и r , а α представляет угол между a и лучом, проведенным к b . При этом движение происходит нормально к b (или b_1) в плоскости, проходящей через a и r , в ту сторону, в которой видна сторона a угла α , если на нее смотреть с другой стороны этого угла ¹. Таков основной электродинамический закон Грассмана, имеющий за собой, во всяком случае, преимущество простоты ². Но против *правильности* его было выдвинуто возражение ³, что этот закон не удовлетворяет началу равенства действия и противодействия, так как он представляет лишь действие на элемент тока того элемента, который соответствует концу тока, но не дает обратного действия. К этому следует, во всяком случае, прибавить, что и Грассман сводит электродинамическое действие только к *элементам тока*, но не к *силам электрических масс*.

Нейман ⁴ при рассмотрении электродинамических действий исходил из явлений *гальванической индукции*, но при этом тоже пришел к выводу взаимодействия электрических элементов. В основу своих выводов он положил следующие *пять опытных положений*: 1) индукционные токи возникают во всех тех случаях, когда возможное действие индуцирующего тока на проводник претерпевает изменение; 2) индуцированная электродвижущая сила не зависит от природы проводника; 3) при прочих равных условиях электродвижущая сила пропорциональна скорости перемещения элементов; 4) составляющая по направлению



Черт. 3.

¹ „Pogg. Ann.“, LXIV, стр. 9.

² Грассман обращает внимание на интересную *аналогию* между *электродинамическим основным законом* и *законом тяготения* („Pogg. Ann.“, LXIV, стр. 11 и 12).

Согласно его „Ausdehnungslehre“ (Leipzig 1844, 2 изд., 1878) можно в качестве произведения двух точек, действующих с силами определенной интенсивности рассматривать расстояние этих точек, помноженное на произведение этих интенсивностей, точно так же в качестве произведения двух отрезков можно рассматривать параллелограмм, образованный этими отрезками (с сохранением их направления); тогда действие тяготения, равно как и электродинамическое действие, представляется формулой ab/r^3 .

³ Гельмгольц, „Pogg. Ann.“, CLVIII, стр. 92; „Wissenschaftl. Abh.“, I, стр. 779.

⁴ „Abhandl. d. Berl. Akad. d. Wiss.“, стр. 1, 1845 (доложено 27 октября 1845 г.) и стр. 1, 1847 (доложено 9 августа 1847 г.). Также: „Vorlesungen über elektr. Ströme“ von Franz Neumann, herausgeg. von van der Mühl, стр. 267 — 295, Leipzig 1884.

ТЕОРИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ ИНДУКЦИИ НЕЙМАНА 169

движения электродинамического действия, которое индуцирующий ток производит на индуцированный, всегда отрицательна; 5) при прочих равных условиях интенсивность индуцированного тока пропорциональна интенсивности индуцирующего. Из этих положений он вывел математически, без дальнейших допущений, выражения для *индуцированной силы тока* и для *индуцированной движущей силы*. В самом деле, если представить себе проводник движущимся таким образом, что всего его элементы имеют одинаковую скорость v , и если обозначить через Cds составляющую по направлению движения электродинамического действия гальванического тока на элемент ds , по которому протекает единица тока, то из вышеприведенных опытных положений для величины *электродвижущей силы, индуцированной током* в элементе проводника, получается формула $E ds = -\epsilon v C ds$, где ϵ обозначает некоторый постоянный коэффициент. *Это основная формула теории Неймана*. Из нее для всей индуцированной в проводнике электродвижущей силы получается выражение $E = -\epsilon \Sigma C v ds$, где суммирование Σ должно быть распространено на все элементы ds проводника. Произведение «силы тока на элемент времени Нейман называет *дифференциальным током* D , а, принимая во внимание, что $D = E dt/w$ (где w обозначает сопротивление), он из предыдущего получает:

$$D = -\frac{\epsilon}{W} \Sigma C v ds \cdot dt.$$

Отсюда для всего действия индуцированного тока за промежуток времени от t_0 до t_1 или для *интегрального тока*, получается формула:

$$J = -\frac{\epsilon}{W} \int_{t_0}^{t_1} dt \Sigma C v ds.$$

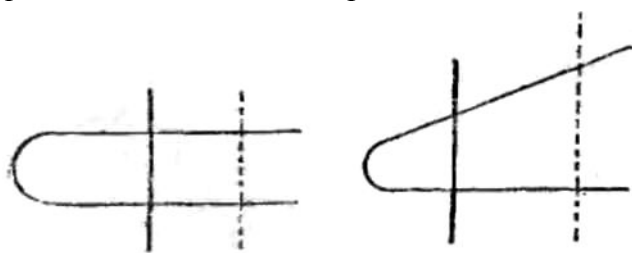
Вставив затем в это выражение вместо C величину, исчисленную на основе закона Ампера, Нейман получает для J выражение, которое имеет силу для всех случаев индукции и из которого могут быть выведены частные значения для отдельных случаев, конечно, после довольно длинных и сложных математических выкладок. Прежде всего, он рассматривает случай, когда *индукция вызывается только движением проводника*, и, следовательно, индуцирующий ток остается в покое; *противоположный случай*, когда проводник остается в покое, а цепь тока движется, равно как случаи, когда *они движутся*, он сводит к *первому* случаю. Последний же случай, когда *индукция происходит вследствие изменения интенсивности индуцирующего тока*, оказывается труднее и требует уже допущения, что действие остается одинаковым, возбуждается ли индуцирующий ток внезапно в цепи, или же он внезапно переносится из далекого расстояния в его последнее положение, или, выражаясь общее, — допущения, что изменение интенсивности инду-

170 ЗАКОН ВЕБЕРА И ТЕОРИЯ НЕЙМАНА

цирующего тока производит совершенно такое же действие, как если бы изменялось его расстояние от проводника. Но тогда можно еще общее доказать, что все изменения тока, вызывающие в проводнике индукцию, имеют равнозначную причину и определенную меру в *изменении величины потенциала* индуцирующего тока по отношению к проводнику в начале и конце индукции. Затем, во второй из приведенных выше работ Нейман формулирует свой общий закон *потенциала* в следующих ясных выражениях: «Если замкнутый и неразветвленный проводник A_1 , переходит путем какого-либо изменения своих элементов, но с сохранением проводящих связей, в другой проводник A_2 иной формы и положения, и если это изменение из A_1 в A_2 происходит под влиянием электрической системы тока B_1 , которая одновременно в силу произвольного смещения своих элементов изменяет свое положение, форму и интенсивность и переходит из B_1 в B_2 , то сумма электродвижущих сил, вызванных этими изменениями в проводнике, равна произведению постоянной индукции ϵ на разность потенциалов тока B_2 по отношению к A_2 и тока B_1 по отношению к A_1 — в предположении, что через A_1 и A_2 протекает единица тока».

С этими-то выводами Неймана Вебер и должен был, прежде всего, согласовать свой общий закон элементарных электрических действий. Если последний был верен, то из него не только должны были вытекать все явления индукции, но следовало также доказать, что он находится в согласии с законами индукции других физиков, или же доказать, что последние неверны. *Такой вывод законов индукции Вебер* дал уже в первой своей работе и это обстоятельство, во всяком случае, являлось сильным доводом в пользу *правильности* самого закона. К сожалению, при сравнении этих результатов с неймановскими, выяснилось, что формулы обоих авторов, *совпадая* вполне для замкнутых токов, *дают противоречивые результаты для действия индуцирующего тока на незамкнутый проводник*. Вебер объяснил это противоречие тем обстоятельством, что Нейман обосновал свой закон на опытном положении Ленца (четвертое из вышеприведенных положений), выведенном из наблюдений над замкнутыми токами и неприменимом к незамкнутым токам.

Тогда и Нейман во второй из указанных выше работ провел это сравнение и подобно Веберу нашел, что для замкнутых токов их формулы действительно дают согласные результаты, а для индуцирующего тока *со скользящими местами*¹ — *противоположные*, т. е. противо-



Черт. 4.

¹ Скользящие места образуются при перемещении подвижной части проводника по неподвижной (см. черт. 4), вызывающем увеличение цепи тока, однако без перерыва последнего. Это увеличение может происходить за счет увеличения одной только неподвижной части проводника или же за счет обеих частей.

ЗАКОН ВЕБЕРА И ТЕОРИЯ НЕЙМАНА 171

ложно направленные индуцированные токи, и что в данном случае только его формула подтверждается на опыте. Однако Нейман не сделал отсюда вывода о совершенной неправильности закона Вебера, а счел вероятным лишь неправильное применение его к данному случаю ¹. И действительно, вскоре после этого Вебер ² показал, что и при существовании в проводнике скользящих мест из его закона можно получить величины, согласные с формулой Неймана, если принять в расчет не только электродвижущие силы, вызываемые подвижной частью тока и элементами, вновь возникающими в точке скольжения, но также электродвижущие силы, возникающие вследствие изменения скорости движения электричества в местах скольжения. После этого Нейман охотно признал, что «Веберу действительно удалось счастливо разрешить данное затруднение», и вообще высказался очень благоприятно о законе Вебера. «Успех, — заявил он, — оказался блестящим. С одной стороны, из этого закона очень просто вытекает закон Ампера для действия двух элементов тока, с другой, — и установленный нами общий закон индукции» ³. После этого закон Вебера был большинством физиков признан, а в учебниках физики он стал применяться исключительно или преимущественно для математического вывода закона индукции. Лишь в последующий период, в течение 60-х и особенно 70-х годов, против основных предпосылок этого закона, а, следовательно, и против его состоятельности вообще были высказаны многочисленные и сильные возражения; но о последних мы будем говорить позднее.

Для количественного определения электродинамических действий и для проверки электродинамических законов до сих пор пользовались только проволочными прямоугольниками Ампера, представлявшими собою довольно неточные приборы. Вебер ввел усовершенствование и в эту часть измерительной техники, превратив бифилярный магнетометр в *электродинамометр*, допускавший достаточно тонкие и в то же время надежные измерения ⁴. Существенную часть этого прибора составляли две цилиндрические катушки с навитыми на них проволоками, из которых одна, неподвижная, была настолько велика, что другая могла в ней помещаться и свободно вращаться. Последняя подвешивалась бифилярно на двух серебряных нитях, придававших ей определенный момент вращения и одновременно служивших для подведения тока. Наблюдение отклонений производилось очень точно, при помощи зеркальца, прикрепленного к подвижной катушке. Начальное положение избиралось таким образом, чтобы плоскости обмоток обеих катушек были взаимно перпендикулярны. При помощи этого прибора Вебер получил возможность не только вновь подтвердить закон Ампера, который служил еще основой и для его собственного закона, но мог также совершенно точно проверить все последующие законы индукции.

¹ „Vorlesungen über elektr. Ströme“, стр. 305, Leipzig 1884.

² „Abhandl. d. K. Sachs. Gesell. d. Wissensch.“, I, Leipzig 1852.

³ „Vorles. über elektr. Ströme“, стр. 305 и 296.

⁴ „Abhandl. bei Begründung der K. Sachs. Gesellschaft“, стр. 211, 1846.

172 СИСТЕМА АБСОЛЮТНЫХ МЕР В ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Столь же важным и плодотворным как для науки, так и для техники оказалось *введение в учение об электричестве системы абсолютных мер. Техник впервые приобрел возможность сравнить полученные им электрические силы с примененными для этого механическими силами и правильно оценить первые. С другой стороны, в области науки возможность приведения всех явлений природы к трем механическим единицам — пространства, времени и массы — представляла собою новое доказательство в пользу внутреннего единства и механической природы всех естественных сил.* Конечно, как раз для электрических сил такое приведение было *нелегкой задачей. Понятие электрической массы, без которого нельзя было обойтись в учении об электричестве, никоим образом не укладывалось в круг механических представлений;* оно могло быть сведено к абсолютной мере лишь *косвенно*, через посредство выраженной уже в абсолютной мере единицы силы, и тем самым по существу дела оно было исключено из математических выкладок.

В качестве *единицы массы* для магнетизма, а, следовательно, и для *статического электричества*, уже Гаусс предложил избрать такую массу, которая, действуя на равную ей массу на расстоянии, равном единице, дает единицу силы. Но для *интенсивности тока* такое определение было недостаточно, так как здесь появляется новый действующий фактор — *скорость*. Однако, поскольку в системе абсолютных мер единица скорости определяется как производная величина, то и сила гальванического тока могла быть легко сведена к абсолютным единицам. Таким образом, в качестве *единицы силы тока* следовало принять силу такого тока, «который возникает, когда через каждое поперечное сечение цепи в единицу времени проходит единица свободного положительного электричества в одном направлении и столько же отрицательного в противоположном»¹. Эту единицу тока В. Вебер назвал *механической*, определенно напомнив, что *абсолютные единицы мер сводят в идее все силы к механическим (т. е. к движущим) силам*. К этому он, однако, тотчас же добавил, что измерение силы тока в этой мере не может быть произведено *непосредственно*, так как нам неизвестны ни количество нейтральной электрической жидкости, содержащейся в кубической единице проводника, ни скорость перемещения электричества в обоих токах. Сила тока не может быть измерена прямо при помощи количеств электричества, а только по действиям их сил, и из этих действий вытекают *три относительные системы мер* для силы тока. Соответственно *химическому действию электролитической единицей силы тока* называют такую, которая в единицу времени разлагает единицу массы воды на ее составные части. Соответственно *магнитному действию магнитной единицей* силы тока называют силу такого тока, который, обтекая плоскость размером в единицу площади, действует на расстоянии совершенно так же, как магнит, обладающий единицей магнетизма, помещенный посредине той же плоскости, причем магнитная ось его направлена перпендику-

¹ „Pogg. Ann.“, XCIX, стр. 11, 1855.

СИСТЕМА АБСОЛЮТНЫХ МЕР В ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА 173

лярно к последней (т. е. сила тока, отклоняющего стрелку тангенс-буссоли с простым кольцом радиуса R на угол $\varphi = \arctg 2\pi/TR$, где T обозначает горизонтальную составляющую земного магнетизма). Наконец, соответственно *электродинамическому* действию *электродинамической единицы* силы тока называют силу такого тока, который протекает по двум параллельным элементам тока, перпендикулярным к соединяющей их линии, когда эти элементы, будучи расположены друг от друга на расстоянии, равном единице, производят друг на друга действие, относящееся к единице силы, как произведение $dsds'$ относится к единице поверхности.

Все эти единицы были указаны Вебером уже в его двух первых работах об электродинамических измерениях; там же были выведены и взаимные отношения этих единиц¹. При этом оказалось, что магнитная единица в $\sqrt{2}$ раз больше электродинамической и в $106^{2/3}$ раза меньше электролитической. Затем в работе 1856 г.² он переходит к установлению *отношения этих единиц к механической единице силы тока* с тем, чтобы, *таким образом, окончательно свести* силу тока к абсолютной мере. Для такого непосредственного сравнения с механической единицей Вебер избрал магнитную единицу тока. Задача сводилась, значит, к следующему. Если дан постоянный ток, отклоняющий стрелку тангенс-буссоли с простым мультипликационным кругом на угол $\varphi = \arctg 2\pi/RT$, то следует определить отношение количества электричества, протекающего при таком токе в одну секунду через сечение проводника, к количеству электричества на каждом из двух одинаково заряженных (бесконечно) малых шаров, которые, находясь друг от друга на расстоянии 1 мм, отталкиваются с силой, равной единице. Но величина первого отталкивания стрелки мультипликатора, по которому в землю отводится некоторое количество свободного электричества из изолированного проводника, зависит только от количества электричества и не зависит от продолжительности разряда; то же самое можно допустить относительно отклонения под влиянием постоянного тока очень малой продолжительности. Далее, следует иметь в виду, что три равенстве отклонений от разряда и от постоянного тока количество электричества одного рода, протекающее через поперечное сечение проводника в последнем случае, представляет лишь половину того количества, которое протекает при разряде, так как в токе одно и то же действие производится двумя противоположными электричествами. Поэтому, если на одной и той же тангенс-буссоли получается одно и то же отклонение от разряда измеренного количества статического электричества E и от тока силы (магнитной), равной единице, действовавшего в течение короткого промежутка τ , то

¹ „Abhandl. bei Begründung der K. S. Gesellschaft der Wissensch.“, 1846; „Abhandl., der K. S. Gesellschaft d. Wiss.“, 1852.

² „Elektrodynamische Maassbestimmungen, insbesondere Zurückführung auf mechanisches Maass“ von W. Weber und R. Kohlrausch, „Abhandl. der K. S. Gesellschaft“, V, стр. 219, 1857; см. также в извлечении в „Pogg. Ann.“, XCIX, стр. 10.

174 ОТНОШЕНИЯ МЕЖДУ РАЗЛИЧНЫМИ ЕДИНИЦАМИ СИЛЫ ТОКА

в последнем случае через сечение проводника в течение этого промежутка протекало количество электричества $E/2$, а в единицу времени $E/2\tau$.

Таким образом, последнее число дает то количество механических единиц силы тока, которое равно магнитной единице силы. Из целого ряда тщательных опытов, давших в силу самой природы вещей, значительно расходящиеся результаты, Вебер и Кольрауш получили для этой величины следующие числа:

Номер ряда опытов	$\frac{E}{2\tau}$	Номер ряда опытов	$\frac{E}{2\tau}$
1	151 000 · 10 ⁶	4	149 800 · 10 ⁶
2	161 300 · 10 ⁶	5	156 250 · 10 ⁶
3	158 500 · 10 ⁶		

Итак, механическая единица относится к магнитной, в среднем, как 1:155 370·10⁶, а в силу сказанного выше:

к электродинамической, как 1:109 860·10⁶

и к электролитической, как 1:16 573·10⁶.

Этим выводом Вебер воспользовался, прежде всего, для того, чтобы определить постоянную c в своем основном электродинамическом законе

$$W = \frac{ee'}{rr} \left[1 - \frac{1}{c^2} \left(\left[\frac{dr}{dt} \right]^2 - 2r \frac{d^2r}{dt^2} \right) \right].$$

В своей второй работе об электродинамических измерениях Вебер доказал, что эта постоянная относится к 4, как электродинамическая единица меры к механической; поэтому из только что определенного отношения между последними он получил для c величину 439 440·10⁶ мм или 59 320 миль. Из формулы легко усмотреть, что это число представляет постоянную относительную скорость, при которой электрические массы совершенно перестают действовать друг на друга. Поэтому Вебер особо отмечает, что при этой величине, постоянной c , электродинамическая часть

$$\frac{ee'}{rr} \cdot \frac{1}{c^2} \left(\left[\frac{dr}{dt} \right]^2 - 2r \frac{d^2r}{dt^2} \right)$$

взаимодействия двух электрических частиц всегда должна исчезать по сравнению с электростатической частью ee'/rr , если, как это имеет место в гальваническом токе, электростатические силы не уничтожаются в результате нейтрализации положительного и отрицательного электричества. Работа Вебера 1856 г. была заключительным актом в деле введения абсолютных мер в учение об электричестве. Единицы электродвижу-

ОТНОШЕНИЯ МЕЖДУ РАЗЛИЧНЫМИ ЕДИНИЦАМИ СИЛЫ ТОКА 175

щих сил и сопротивлений Вебер выразил в относительных единицах еще в своей работе 1852 г.¹; с помощью же механической меры силы тока он теперь получил возможность свести к той же мере и упомянутые две единицы. С помощью абсолютной меры магнетизма Вебер в качестве *абсолютной единицы электродвижущей силы* определил такую силу, которая возбуждается единицею магнитной силы в круговом проводнике единицы площади, когда последний в течение секунды поворачивается из положения, параллельного направлению магнитной силы, в положение, к нему перпендикулярное. Соответственно этому определению единица электродвижущей силы могла быть прямо измерена. Вебер устроил для этой цели особый прибор, названный им *земным индуктором*, так как в качестве индуцирующего магнетизма у него служил земной магнетизм.

После того как была найдена абсолютная мера для силы тока и для электродвижущей силы, абсолютная мера *сопротивления* могла быть уже легко определена по формуле $W=E/J$, вытекающей из закона Ома. Следовательно, *абсолютной единицей сопротивления* являлась такая величина последнего, при которой в цепи с единицей электродвижущей силы получалась единица силы тока. Эти *измерения сопротивлений* приобрели впоследствии особое значение не только в связи с непосредственным применением их ко многим теоретическим и практическим проблемам, но и косвенно для определения электродвижущей силы. В самом деле, в соответствии с характером избранной для последней единицы, *прямое* измерение электродвижущей силы было возможно только для индукционных толчков, вызываемых механической силой; для всех же прочих случаев возникновения электродвижущей силы непосредственное применение этой единицы было невозможно. Наоборот, для определения сопротивлений в абсолютной мере достаточно было только измерения этой мерою *одного* какого-либо известного сопротивления, все же остальные определялись тогда в абсолютных единицах путем сравнения с последним. Итак, если однажды было определено в абсолютной мере *нормальное сопротивление*, последнее уже служило непосредственной мерой для сопротивлений в отдельных случаях, а затем формула Ома $E=J \cdot W$ могла быть применена и для *определения электродвижущей силы* в абсолютных единицах. Таким образом, *наиболее точное определение нормального сопротивления, или общепризнанной единицы сопротивления, стало основной проблемой измерительной техники в области электричества*. Предложенная Вебером абсолютная единица сопротивления соответствовала по своему смыслу *скорости* и была одной размерности с последнею; в соответствии с избранными единицами длины и времени она была обозначена *мм/сек²*.
Методы приведения любых сопротивлений

¹ „Elektrodynamische Maassbestimmungen, insbesondere Widerstandsmessungen“, „Abhandl. der K.Sachs. Gesellschaft“, 1, стр. 197, 1852; „Pogg. Ann.“, LXXXII, стр. 337.

² Вебер, подобно Гауссу, принимал в качестве абсолютных мер длины времени и массы миллиметр, секунду и миллиграмм.

176 ЕДИНИЦА СОПРОТИВЛЕНИЯ

к этой единице Вебер подробно описал в своей работе 1852 г., где он привел и несколько примеров такого приведения. В 1846 г. Якоби, разослав физикам медную проволоку $7619^{3/4}$ мм длиной, $^{2/3}$ мм диаметра в сечении и $22\,449^{3/10}$ мг веса, предложил принять ее в качестве *нормальной единицы сопротивления*¹. Вебер определил это сопротивление в абсолютной мере и нашел его равным $598 \cdot 10^7$ мм/сек². Этот эталон был долгое время в употреблении, но мало-помалу выяснилось, что его сопротивление *отнюдь не постоянно* и что, следовательно, в качестве нормальной единицы он не пригоден. Поэтому в 1860 г.³ В. Сименс предложил принять в качестве единицы сопротивления призматического столба ртути в 1 м длиной и 1 мм^2 сечения при нуле градусов. В работе 1861 г. Вебер определил абсолютную величину этой единицы и нашел ее равной $10\,257\,000$ м/сек. Наконец, в 1861 г.⁴ этот вопрос вступил в новую стадию благодаря тому, что Британская ассоциация и Лондонское королевское общество назначили для разработки этого вопроса специальную комиссию с У. Томсоном во главе. Эта комиссия в принципе рекомендовала принять абсолютную единицу сопротивления Вебера, но для более удобного применения на практике предложила увеличить ее в 10^7 раз⁵. Однако работы комиссии и дискуссии по поводу ее предложения затянулись настолько, что окончательное соглашение по этому вопросу последовало лишь двадцать лет спустя на Парижском конгрессе электриков 1881 г. Конгресс тоже принял абсолютную систему мер Вебера, но только вместо миллиметра, секунды и миллиграмма в качестве основных единиц им были приняты сантиметр, секунда и грамм, а в качестве абсолютной единицы сопротивления была принята величина, равная 10^9 см/сек. Для того чтобы при этих единицах оставить в силе закон Ома, пришлось увеличить в 10^8 раз веберовскую единицу электродвижущей силы и уменьшить в 10 раз его единицу силы тока. Определенные таким образом единицы, к которым прибавили еще единицы количества электричества и емкости, назвали, в честь соответствующих ученых, *ом*, *вольт*, *ампер*, *кулон* и *фарада*. К сожалению, имя Вебера, действительного основоположника всей этой системы мер, осталось при этом в стороне; это получилось по чисто внешней причине, так как словом «*вебер*» уже ранее была названа другая единица⁶.

¹ „Comptes rendus“, XXXIII. стр. 277.

² „Pogg. Ann.“, LXXXII, стр. 358.

³ Там же, CX, стр. 1.

⁴ „Abhandl. der K. Ges. d. Wiss. zu Göttingen“, X, стр. 1, 1862.

⁵ Ф. Кольрауш в 1870 г. произвел („Pogg. Ann.“, дополнительный том VI, стр. 1, 1874) в лаборатории В. Вебера новое определение предложенных единиц в абсолютной мере. Он нашел единицу Сименса равной $9\,717\,000\,000$ мм/сек или 0,9717 земн. квадрант/сек. Единица Британской ассоциации, определенная в 1864 г. в 1,0493 единиц Сименса, была, следовательно, равна 1,0196 земн. квадрант/сек. и оказалась, таким образом, почти на 2% больше предположенной величины. Кольрауш высказал предположение, что в измерение Британской ассоциации могла вкратиться ошибка, вызванная индукционными токами в массивном латунном штативе, поддерживавшем вращающуюся катушку.

⁶ Ф. Дженкин приводит („Pogg. Ann.“, CXXVI, стр. 369) следующие данные об эволюции измерения сопротивлений. Дэви в 1821 г. доказал („Phil. Trans.“, стр. 425, 1821), что проводимость металлов различна и изменяется с температу-

СКОРОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА 177

Следует еще упомянуть о нескольких отдельных явлениях этого периода, находящихся в меньшей связи с общим ходом научного развития.

Уокер ¹, Митчель ² и Гульд ³, каждый в отдельности, измерили в 1848 г. скорость электричества в телеграфных проводах и получили очень расходящиеся между собою, но, во всяком случае, *значительно меньшие числа, чем Уитстон*, а именно 25 000, 45 000 и 25 000 км в секунду. Наоборот, Физо и Гунелль ⁴, произведя соответствующие измерения над телеграфными проводами между Парижем и Руаном, «снова получили значительные величины; а именно, на железном проводе с 7-мм диаметром — 101 710 км, а на медном с 2,5-мм диаметром 177 722 км. Значительное колебание результатов отдельных опытов Физо ⁵ был склонен приписать только многочисленности источников ошибок при этих измерениях; Гогэн ⁶ же полагал, что *продолжительность распространения электричества действительно не постоянна*,

а зависит от многих условий и что она может быть приравнена Cl^2/kw ,

где C обозначает некоторый коэффициент заряжения, l — длину провода, k — проводимость и w — сечение провода. К совершенно таким же выводам пришел в новейшее время Гагенбах ⁷. Он указал на то обстоятельство, что при всех подобных измерениях наблюдается не скорость *стационарного течения*, а только *скорость заряжения*;

рою. В начале 20-х годов исследования по вопросу о проводимости опубликовали также Кэмминг, Сноу Гаррис и Беккерель. Обратное понятие сопротивления было введено Омом в 1827 г.; им же было введено понятие „приведенной длины“, которое применялось долгое время при измерении сопротивлений. Ленц в 1838 г. принял („Pogg. Ann.“, XLV, стр. 105) у себя о качестве нормального сопротивления медную проволоку (№ 11) в 1 фут длины; согласно его сообщению последнее в 19,9 раз превышало то сопротивление, которое он применял в 1833 г. („Pogg. Ann.“, XXXIV, стр. 418). Уитстон в 1843 г. предложил («Phil. Trans.“, стр. 303, 1843) применять в качестве нормального эталона медную проволоку в 1 фут длиной и 100 гран веса. Ганкель в 1846 г. применил для той же цели („Pogg. Ann.“, LXIX, стр. 255) железную проволоку. Д. Б. Кук в 1847 г. („Philosophical Magazine“ (3), XXX, стр. 385) упоминает о проволоке, которая по своим размерам и проводимости годилась бы в качестве нормального сопротивления. Буфф („Pogg. Ann.“, LXXIII, стр. 497) и Горсфорд („Silliman's Journal“, V, стр. 86) применяли в качестве эталонов проволоки из нейзильбера, пока в общее употребление не вошел эталон Якоби. С 1850 г. потребность в точных измерениях сопротивлений была вызвана техникой подземных и подводных кабелей, так как этим путем можно было на расстоянии находить место повреждения провода. В Англии с этой целью уже с 1847 г. стали применять катушки сопротивлений Кука, устроенные, по-видимому, на основе единиц Уитстона. В это же время Варлей описал грубый метод определения места порчи путем измерения сопротивления. В. Сименс предложил аналогичный, но более совершенный метод („Pogg. Ann.“, LXXIX, стр. 481); в 1852 г. Чарльз Брайт получил патент на подобные определения.

¹ „Silliman's Journal“. VIII, стр. 142, 1848.

² „Pogg. Ann.“, LXXX, стр. 161.

³ Там же. дополнительный том III, стр. 374.

⁴ „Comptes rendus“, XXX, стр. 437; „Pogg. Ann.“, LXXX, стр. 158.

⁵ „Comptes rendus“, XXXII, стр. 47.

⁶ Там же, L, стр. 395.

⁷ „Verhandl. d. naturf. Gesellschaft in Basel“, VIII, стр. 165, 1886.

178 РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА В ПУСТОТЕ

на основании своих собственных опытов он нашел, что *время заряжения, правда, не зависит от абсолютной величины потенциала заряда, но для различных проволок с одинаковыми относительными пограничными условиями оно изменяется пропорционально квадрату длины проволоки, емкости единицы и сопротивлению единицы и что, следовательно, с удлинением провода скорость распространения электричества убывает в квадратном отношении*. С этим мнением вполне согласуется факт соединения *незначительной скорости распространения электричества в морских подводных кабелях* (определенной, например, между Лондоном и Брюсселем всего в 4300 км), — с *резкими явлениями их заряжения*, которые многократно наблюдали и отметили Уитстон, Фарадей и Сименс.

Упомянутые уже нами раньше исследования Фарадея ¹ над явлениями *разряда электричеств* и наблюдаемая им *зависимость их от среды*, в которой эти разряды происходят, привлекли внимание физиков к вопросу о *проводимости газов и распространении электричества в пустоте*. В 1835 г. А. Массону ² удалось пропустить ток сильной катушки Румкорфа через торическую пустоту; последняя при этом наполнилась бледным фосфоресцирующим светом. Однако по этому поводу тотчас же отметили, что вакуум здесь был неполный, и указали, что и в данном случае явления разряда в большой степени зависели от остатков разреженного воздуха и от присутствия ртутных паров. После этого Д. П. Гассиот ³ с целью наблюдения этих интересных явлений устроил стеклянные трубки с выкачанным до немногих миллиметров давления воздухом, которые можно было наполнять другими сильно разреженными газами. Несколько лет спустя подобные трубки стали изготовлять Гейсслер в Бонне и притом настолько высокого качества, что они с тех пор стали носить его имя ⁴. Эти приборы возбудили очень большой интерес во всех слоях и вызвали до начала шестидесятых годов множество исследований над электрическими разрядами в пустоте. Однако, во всяком случае, в тот период они еще не вполне оправдали связанные с ними ожидания и оказались скорее интересными приборами для развлечения, чем для научных целей, и орудиями для привлечения скорее друзей науки, чем исследователей. Кроме *мерцающего света* на катоде, наблюдавшегося еще Фарадеем, и *слоистого света* на аноде, с помощью которого тщетно пытались найти доказательства в пользу волнообразного движения, или по крайней мере интерференции электричества, а также кроме давно известного *влияния на этот свет магнита*, эти трубки не давали ничего особенного. Серьезное научное значение они приобрели лишь

¹ См. первый выпуск настоящей части, стр. 272.

² „Comptes rendus“, XXXVI, стр. 258. А. Ph. Masson (1806—1860) — профессор в Париже.

³ „Rep. of the Brit. Assoc.“, 1854, Trans. of the sect., стр. 68.

⁴ Плюкер, предложивший применять это название („Pogg. Ann.“, СIII, стр. 88. 1858), говорит „Я вполне обоснованно называю их (трубки) его (Гейсслера) именем, хотя первые трубки были изготовлены не им“. — Heinrich Geissler (1814—1879) — стеклодув из Тюрингии, впоследствии владелец мастерской химических и физических приборов в Бонне.

в течение последующего периода и особенно в самые последние годы. Для этих опытов, при наличии больших сопротивлений в трубках, могли применяться лишь *разряды лейденских банок* или *индукционные токи высокого напряжения*. После изобретения вагнеровского молоточка последние стали гораздо удобнее, и индукционные аппараты подобной конструкции уже давно были в ходу. Так, общеизвестный санный (так в оригинале, прим. копировщика) аппарат, употребляемый и до сих пор в своем первоначальном виде, был устроен дю-Буа-Реймоном еще до 1849 г.¹ Румкорф же начал изготавливать свои сильные катушки в 1850 г.; в 1864 г. он получил за них наполеоновскую премию в 50 000 фр.

Приведенные исследования очень мало повлияли на *теорию естественных разрядов атмосферного электричества*, и отмеченные Араго *линейные, плоские и шарообразные формы молнии* оставались по-прежнему необъясненными. Впрочем, Т. де-Монсель² попытался в своей «*Théorie des éclairs*» («Теория молний») найти для них аналогии в искусственных электрических разрядах. По его мнению, длина молний, а также отклонение их от прямолинейной формы являются результатом действия дождя и сгущенного водяного пара, служащих для них вторичным проводником. Если лакированную поверхность покрыть тонким слоем воды, то проскакивающая по ней искра индукционной катушки окрашивается в некоторый цвет, который зависит от толщины водяного слоя. Но при большей толщине последнего искра чаще заканчивается красным шаром, что соответствует шаровидной молнии. В 1859 г. Тессан³ дал другое объяснение этой форме молнии, которое, однако, представлялось маловероятным. Каждая шаровидная молния представляет собою, по его мнению, подобие лейденской банки. Изолятором последней служит шарообразный слой воздуха, сжимаемый изнутри и снаружи притяжением электричества. Вследствие непрерывного истечения электричества с поверхности этот шар светится, а вследствие большего или меньшего сжатия внутри воздуха он сравнительно медленно опускается или поднимается в атмосфере.

Наблюдениями над *грозовым* и вообще *атмосферным электричеством* занималось все больше исследователей. Г. Шюблер⁴ еще в предшествующий период наблюдал как дневной, так и *годовой периоды* нормального атмосферного электричества, а также установил зависимость грозового электричества от направления ветра. Делльман усовершенствовал приборы для наблюдений и производил последние все с большей точностью. Однако теория атмосферного электричества все-таки не сделала успехов — происхождение этого электричества, несмотря на обилие уверенных утверждений по этому вопросу, оставалось

¹ Свои капитальные работы о животном электричестве (которых мы здесь касаться не можем) дю-Буа-Реймон опубликовал в 1843 г. в диссертации; с 1845 г. он их помещал в „*Fortschritten der Physik*“, а с 1848 г. изложил в своей главной работе „*Untersuchungen über die thierische Electricität*“ 2 тома, Berlin 1848 и 1849. Emile-Heinrich du Bois-Reymond (1818—1896) — профессор физиологии в Берлине.

² „*L'Institut*“, стр. 47, 1854.

³ „*Comptes rendus*“, XLIX, стр. 189.

⁴ „*Grundsätze der Meteorologie*“, Leipzig 1831.— G. Schübler (1787—1834)— профессор ботаники в Тюбингене.

180 ЗЕМНОЙ МАГНЕТИЗМ

все же невыясненным. С начала этого столетия вслед за Соссюром и Вольтовой *его источник* искали в *процессе испарения воды*, полагая, что образовавшийся пар при этом оказывается наэлектризованным положительно, а остающаяся вода — отрицательно. Пуллье¹ уточнил эту теорию, утверждая, что чистая вода при испарении не дает электричества, а дает его лишь в присутствии примесей, причем она наэлектризовывается отрицательно при наличии солей и кислот и положительно — при наличии щелочей. Пельтье оспаривал и это мнение, утверждая, что электричество может возникнуть лишь при быстром толчкообразном кипении воды в конце опыта Лейденфроста. Ф. Рейх² нашел и это объяснение неправильным, утверждая, что без особых причин электричество никогда не возникает ни при испарении, ни при сгущении воды. Наконец, в 1846 г. П. Рисс прямо заявил: «*Причина атмосферного электричества еще не выяснена*»; если оно наблюдается при испарении воды, то оно происходит только вследствие трения частичек жидкости о стенки сосуда³. Беккерель⁴ попытался подойти к этой проблеме с более широкой точки зрения. По его мнению, электрическое равновесие нарушается при всех молекулярных изменениях веществ, поэтому атмосферное электричество может иметь самые разнообразные источники своего происхождения. К числу подобных источников атмосферного электричества он относит: 1) истечение кислорода и угольной кислоты из листьев растений; 2) соприкосновение воды с сушей; 3) разложение органических веществ; 4) соприкосновение теплых и холодных вод. Этим объясняется относительно редкое появление грозы у полюсов, посредине морей и больших материков. По этому поводу обозреватель журнала «*Fortschritte der Physik*» отметил, что указанными источниками объясняется, может быть, атмосферное электричество, но никак не грозовое электричество, возникающее внезапно и столь сильно зависящее от ветров.

Подобную же судьбу, как атмосферное электричество, испытал и *земной магнетизм*. Раньше земной магнетизм считали *естественным состоянием земли*, не требующим каких-либо дальнейших объяснений. Однако после того как наблюдения «Магнитного союза» и точные измерения магнитных постоянных в различных местах и в разное время с несомненностью доказали существование *периодических и аperiodических изменений* этого состояния, пришлось сделать попытку *свести и земной магнетизм к более отдаленным изменчивым причинам и привести его в более тесную связь, чем это было до сих пор, с другими силами природы*. Проще всего представлялось, конечно, объяснить магнетизм земли, подобно магнетизму всякого другого тела, *электрическими токами*; а последние даже поставили в связь с разностью температур на земле, как только было открыто термоэлектричество. Теперь же надеялись при помощи проведенных повсюду телеграфных

¹ „Ann. de chim. et de phys." (2), XXXV. стр. 401, 1827.

² „Abhndl. bei Begründung der K. S. Gesellsch.", стр. 197, 1846.

³ „Pogg. Ann.", LXIX. стр. 286, 1846.

⁴ „Comptes rendus", XIII, стр. 1101, 1856.

МАГНЕТИЗМ И МОЛЕКУЛЯРНОЕ СОСТОЯНИЕ МАТЕРИИ 181

проводов непосредственно наблюдать, эти токи; и, действительно, У. Барлоу¹, равно как и другие физики, при опытах с телеграфными проводами, не находившимися в эксплуатации, установили, что по проводам, погруженным обоими концами в землю, всегда проходят токи, что эти токи появляются одновременно и в равном количестве на обеих станциях, что эти токи имеют своим источником не атмосферу, а землю, и что сила их проявляет колебания как регулярные, так и нерегулярные. Однако и для этих токов опять пришлось искать ближайшую причину, поэтому внимание было все-таки больше сосредоточено на тщательном изучении фактического состояния земного магнетизма на земле, чем на причинах последнего. Ганстен в 1855 г. попытался² еще раз в противовес данному Гауссом распределению магнетизма на земле провести свою ранее предложенную гипотезу о *четырёх магнитных полюсах* земли, но опять не имел успеха. Ламонт в 1851 г.³ вывел из мюнхенских наблюдений *период колебания магнитных склонений приблизительно в 10,3 года*. Р. Вольф⁴ по этому поводу в 1852 г. указал, что период магнитных колебаний совпадает с *периодом солнечных пятен*, но что этот последний составляет 11,1 лет. Некоторые другие физики указали на *влияние луны* на постоянные земного магнетизма, и эти наблюдения были тоже многократно подтверждены. Во всяком случае, из этих утверждений как будто вытекало, что солнце, луна, а может быть, и другие светила влияют на магнитные явления нашей земли, вследствие чего последние уже нельзя объяснять одними лишь тепловыми действиями. После работ Ампера *магнетизм* мало привлекал к себе внимание физиков. Подобно тому, как естественный магнит все больше вытеснялся электромагнитом, так и учение о магнетизме, естественно, должно было все больше вливаться в теорию электромагнетизма. Но так как магнетизм все-таки обычно связывали с особым молекулярным состоянием материи, то исследователи попытались в свою очередь *вызвать подобные молекулярные изменения при помощи магнетизма*. Р. Гонт в 1846 г.⁵ сообщил о своем наблюдении, что под влиянием магнитного полюса соли «выкристаллизовываются из растворов по правильным кривым. Около этого же времени Джоуль⁶ наблюдал *удлинение* железных стержней при намагничивании их электрическим током — удлинение это зависело лишь от длины стержня к напряженности магнетизма и не сопровождалось заметным увеличением толщины стержня. В. Вертгейм⁷ в 1852 г. установил, что намагниченный до насыщения железный прут *размагничивается* в тот момент, когда он подвергается временному кручению, и *снова приобретает магнетизм* в момент рас-

¹ „Phil. Trans.“, стр. 61, 1849.

² „Astronomische Nachrichten“, XL, стр. 169, 1855. — Christopher Hansteen (1784—1873) — директор обсерватории в Христиании.

³ „Pogg. Ann.“, LXXXIV, стр. 572. — Joh. Lamont (1805—1879) — директор Богенгаузенской обсерватории около Мюнхена.

⁴ „Comptes rendus“, XXXV, стр. 704.

⁵ „Philosophical Magazine“ (3), XXVIII, стр. 1, 1846.

⁶ Там же, XXX, стр. 76.

⁷ „Comptes rendus“, XXXV, стр. 702; „Pogg. Ann.“, LXXXVIII, стр. 331.

182 ТЕОРИЯ МАГНЕТИЗМА

кручения. Три года спустя ¹ он занялся этим явлением более подробно и нашел, что кручение и раскручивание сами по себе не намагничивают мягкого железа, но во время процесса намагничивания они, подобно всякому механическому встряхиванию, содействуют намагничиванию. Насыщенный же магнетизм от кручения ослабевает, а при раскручивании снова восстанавливается. Более твердые сорта железа дают результаты, отличающиеся от указанных лишь в количественном отношении. Для объяснения этих явлений прежние теории представлялись недостаточными. Вертгейм сделал допущение, что магнетизм заключается в эфирных колебаниях атмосфер молекул, которые всегда существуют в ненамагниченном железе и при намагничивании приобретают лишь полярность. Размагничивающая сила представляет собою, следовательно, косность эфира, противодействующего поляризации. Если, далее, принять, что весомые частицы при своем вращении увлекают за собою колебания эфира, то первоначально одинаково направленные колебания при кручении частично расстраиваются, а при раскручивании снова возвращаются в прежнее положение. Аналогичными молекулярными движениями Вертгейм объясняет и колебания земного магнетизма. После Вертгейма опытами, касающимися связи между магнетизмом и изменением положения молекул, занимался Г. Видеман ², хотя последний и не углублялся в молекулярную теорию в такой степени, как его предшественник. Согласно его опытам магнитный стержень, намагниченный гальваническим током и затем размагниченный током противоположного направления, от простого сотрясения снова становится магнитным. Подобно тому, как кручение влияет на магнитность, так и, наоборот, магнетизм влияет на кручение. Если железную проволоку закручивать во время или после прохождения гальванического тока, то она намагничивается и во время закручивания действует индуктивно на соседний провод. Подобно кручению действуют также изгибание, изменение температуры стержней и т. д.

Соотношение между магнетизмом и внутренними движениями в телах было особенно интересно для физиков, так как представлялось, что его можно объяснить, только исходя из допущения, что железо и сталь составлены из молекулярных магнитов, а это было чрезвычайно важно для атомистики ³. Беец в своей работе «Über die innige

¹ „Comptes rendus“, XL, стр. 1234; „Pogg. Ann.“, XCVI, стр. 171.

² „Über den Magnetismus der Stahlstäbe“, „Pogg. Ann.“, C, стр. 235; „Beziehungen zwischen Magnetismus, Wärme und Torsion“, там же CIII, стр. 563; „Über die Torsion und die Beziehungen derselben zum Magnetismus“, там же, CVI, стр. 161; „Über die Biegung“, там же, CVII, стр. 439; „Beziehung zwischen Torsion und Magnetismus“, там же CVII, стр. 439; „Einfluss der Temperaturveränderungen auf den Magnetismus“, там же, CXXII, стр. 346; „Inductionsströme beim Tordiren von Eisendrähten“, там же, CXXIX, стр. 616. См. также „Die Lehre von der Elektrizität“, III, стр. 666, Braunschweig 1883.—Gustav-Heinrich Wiedemann (1826—1898)

с 1854 г. профессор физики в Базеле, с 1863 г. — в Брауншвейге, с 1866 г.— в Карлсруэ, с 1871 г. — профессор физической химии, а затем — физики в Лейпциге.

³ Поэтому и Фехнер в своем „Atomenlehre“, стр. 41 (Leipzig 1864), ссылается на опыты Видемана как на довод в пользу атомистики.

ТЕОРИЯ МАГНЕТИЗМА 183

Vorgänge, welche die Magnetisirung bedingen» («О внутренних процессах, обуславливающих намагничивание») ¹ исходит из положения Б. Вебера ², согласно которому молекулярные изменения, которые должны происходить в железе и стали при переходе их в магнитное состояние, могут быть объяснены следующими четырьмя допущениями: 1) существованием двух магнитных жидкостей, которые обладают подвижностью независимо от своих весомых носителей (Кулон и Пуассон); 2) существованием двух магнитных жидкостей, которые могут двигаться лишь совместно с молекулами весомого вещества; 3) существованием непрерывных молекулярных токов, образуемых двумя электрическими жидкостями и способных вращаться вместе с молекулами (Ампер); 4) существованием двух подвижных электрических жидкостей, способных двигаться без сопротивления по особым путям вокруг покоящихся молекул. Вебер принял последнюю гипотезу, при этом, однако, он признал, что опыт скорее говорит в пользу вращающихся молекул. Бетц же исключил все гипотезы, исходящие из идеи о неисчерпаемом количестве электрических или магнитных жидкостей, так как опыты вполне определенно показали, что отношение m/p между интенсивностью магнетизма m и магнетизирующею силою p отнюдь не постоянно, хотя и приближается к известному пределу. Соответственно этому из приведенных гипотез он оставляет только две, согласно которым электрические или магнитные жидкости, которые своим разделением обуславливают намагничивание, имеются только в ограниченном количестве, или согласно которым намагничивание происходит только вследствие вращения молекул, которые следует рассматривать как молекулярные магниты, в силу ли постоянного разъединения жидкостей или вследствие обтекания их молекулярными токами. Опыты Видемана он считал уже достаточными для разрешения вопроса в пользу последней гипотезы. В качестве дальнейшего доказательства он приводит произведенный им опыт электролитического выделения железа в связанной форме из раствора по методу Р. Беттгера между ветвями магнита; при этом он получил пластинки железа, твердые, как стекло, и столь сильно намагниченные, что при всех последующих размагничиваниях и намагничиваниях они проявляли резко выраженную склонность к сохранению своей первоначальной магнитности. Это явление, которое можно сравнить с *упругим последствием* и которое было отмечено также Видеманом, требовало, по его мнению, *принятия гипотезы о вращении молекул при намагничивании, а, следовательно, и допущения молекулярных магнитов.*

¹ „Pogg. Ann.", CXI, стр. 107, 1860. — Wilh. Beetz (1822—1886) — профессор физики в Мюнхенском политехникуме.

² „Elektrodyn. Maassbest., insbes. über Diamagnetismus", „Abhandl. d. K. S. Gesellsch. d. Wissensch.", I, стр. 541, 1852.

ЧЕТВЕРТЫЙ ПЕРИОД ФИЗИКИ В ПОСЛЕДНЕМ СТОЛЕТИИ

(приблизительно от 1860 по 1880 г.)

ВОЗНИКНОВЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

С начала нашего столетия вплоть до настоящего времени в физике все больше и больше приближались к *дуалистическому воззрению на материю*, противопоставляя *весомой материи* единое невесомое вещество, *эфир*, вместо многочисленных прежних невесомых. С этим дуализмом материи был связан и *дуализм силы*. Для *весомой материи* сохранили по-прежнему допущение элементарной *первичной силы*, действующей непосредственно на расстоянии притягательно или отталкивательно; многообразные же действия эфира, при невозможности присвоить последнему соответственно большое число *первичных сил*, пришлось объяснять особыми *движениями*. Однако дуализм материи совершенно отличен от дуализма сил. Если на различные виды материи смотреть не как на *абсолютно* элементарные виды, то и при допущении некоторой однородной *первичной материи*, всегда наиболее доступной для нашего понимания, все-таки представляется возможным существование *относительно* элементарных материй, различающихся по обоим внутренним движениям и строению. *И действительно, в новейшее время большинство физиков оставило по меньшей мере открытым вопрос о конечном тождестве двух основных видов материи и неоднократно сводило различие между весомой материей и эфиром только к большему внутреннему движению и обусловленной этим большей делимостью последнего.* С точки зрения такого воззрения дуализм силы представляет собою абсолютное противоречие. Ведь если две основные формы материи по существу тождественны и отличаются друг от друга лишь по степени движения, то допущение существования у одной из них *первичной силы* как основного ее свойства, при полном отсутствии такого же свойства у другой, представляется совершенно невероятным. Вполне сознавая значение этого противоречия, физики постоянно стремились *устранить* этот дуализм сил, стараясь заменить его унитарным воззрением; к осуществлению этой цели шли *тремя путями*.

Физики-математики, опирающиеся на *Ньютона*, и *физики-философы*, опирающиеся на метафизику *Канта*, утверждают, что последняя причина всякого действия силы заключается в *первич-*

ВОЗНИКНОВЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ 185

ных притягательных и отталкивательных свойствах материи и что все движения эфира тоже должны быть сведены к таким же свойствам. Однако такое допущение, если его рассмотреть в полном его теоретико-познавательном смысле, несовместимо с *философией Канта*, так как согласно этой философской системе конечными причинами никогда не могут быть *феномены*, а лишь *ноумены*. Конечные причины, как ничем не обусловленные, принадлежат к области *свободы* и не подпадают под действие естественнонаучной *необходимости*. Делая подобное допущение, натуралист выходит за пределы своей области.

Другая, и в настоящее время очень многочисленная, группа физиков пыталась поддержать *единство воззрения на силы* тем, что, не входя вообще в более детальное рассмотрение присущих материи дееспособностей, она рассмотрела и определила только вид и величину ее работоспособностей. Путь к такому сужению пределов исследования легко проложил *закон сохранения силы*. Уже самими основоположниками этого закона было отмечено, что он может быть отнесен не к последним причинам явлений, к первичным силам как неизменным свойствам материи, а только к ограниченным работоспособностям, свойственным телу в силу его положения и движения. Для того чтобы резче оттенить эту точку зрения, и самое выражение сила, в смысле ограниченной работоспособности, было вскоре совершенно оставлено и заменено термином *энергия*. В провозглашении закона сохранения энергии как всеобщего начала естествознания рассчитывали найти средство обойти трудности, связанные с понятиями силы и материи. И действительно, после того как были установлены полная превратимость всех видов энергии друг в друга и неизменность количества ее при всех таких превращениях, ближайшее рассмотрение происходящих в материи процессов, недоступных для наблюдения переходов движений с масс на внутренние части последних, представлялось ненужным. Коль скоро однажды был установлен вид перехода одной формы энергии в другую и определено количественное отношение между обеими этими формами, то на основании этого закона уже легко по количеству преобразующейся энергии исчислить количество вновь образовавшейся. Благодаря этому количественное изучение естественных явлений стало независимым от рассмотрения внутренних процессов в материи; и даже там, где последние были совершенно неизвестны, закон сохранения энергии представлял вполне надежный *мост* для перехода от одного непосредственно наблюдаемого явления к другому. *В этом обстоятельстве заключается громадное значение этого начала, его мощное и весьма плодотворное влияние на все естествознание.*

Однако и это воззрение на явления природы не было свободно от трудностей, которые, конечно, сказывались не столько при применении, сколько при обосновании основного принципа. Сколько бы ни старались сообщить понятию энергии абсолютную

186 ВОЗНИКНОВЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

реальность¹, все же при полной невыясненности вида присущей телам дееспособности нельзя было чисто физическим путем, без помощи теоретико-познавательных средств, обосновать ни постоянства, ни изменчивости этой способности. Сколько бы закон сохранения энергии ни признавался всеобщим физическим началом, но по вопросу о правильном обосновании этого закона не было уверенности и единомыслия. Экспериментальная физика могла в очень многих случаях путем измерения проверить этот закон и тем сделать его всеобщность в высшей степени вероятной; но для такого фундаментального применения этого закона, о каком речь была выше, подобное индуктивное доказательство многим физикам казалось еще недостаточным. К этому присоединялось еще и то обстоятельство, что этот закон и самой энергии касался лишь с одной стороны, а именно, со стороны ее *количественной неразрушимости*, не касаясь вовсе другой ее стороны — *качественной способности к превращению*. Обе эти причины одинаково вели от энергии назад к ее *источникам*; а так как допущение различных элементарных сил, связанных с различными материями, казалось настолько несовместимым с представлением о всесторонней способности к взаимному превращению различных форм энергии, насколько с ним согласовалось допущение *единой, наделенной лишь различными внутренними движениями материи*, то значительная часть физиков пришла теперь к заключению, *что все виды энергии следует выводить из движения и все физические явления следует строить на чисто кинетической основе. Это не значит, что данные физики сразу стали отрицать существование каких бы то ни было сил в материи и отказались от применения обычной номенклатуры*, — они лишь высказывались против того, чтобы эти силы рассматривались как *конечные причины* явлений, и твердо *надеялись, что все действия сил, которые до сих пор еще не были сведены к внутренним движениям материи как к своим причинам, будут, в конце концов, к ним сведены*. Хотя это последнее направление в физике,

¹ Тэт в своем интересном сочинении „Properties of matter“, Edinburgh 1885 (немецкий перевод „Die Eigenschaften der Materie“, Wien 1888), говорит: „Уже из повседневного опыта он (читатель) должен был, конечно, вынести убеждение в объективном существовании материи... Но, с другой стороны для многих читателей будет, пожалуй, несколько ново узнать, *что энергии так же присуще объективное существование, как и материи* (стр. 3)... Опытами доказано, что энергия столь же мало, как и материя, может быть уничтожена или создана человеком. Она, следовательно, существует независимо от чувств и мысли человека, хотя она может быть познана лишь при их посредстве“ (стр. 4). Однако следующая затем фраза показывает, что и сам Тэт чувствует потребность свести противоположность между материей и энергией к противоположности между *материей и движением* или, еще лучше, заменить их единством *движущейся материи*: „Очень важно... то обстоятельство, что энергия встречается не иначе, как в связи с материей. Поэтому на материю можно смотреть, как на носителя или приемник энергии; *более чем вероятно, что, в конце концов, все различные формы энергии будут признаны зависящими от различного состояния движения материи*“ (стр. 4). Попутно отметим: то обстоятельство, что в указанной работе кое-где дается неправильное освещение методической и исторической сторон развития физики, представляется естественным, если принять во внимание известную крайнюю манеру суждения Тэта.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ 187

пожалуй, и не было выражено в систематическом и строго обоснованном виде, однако работы нового времени и по своему содержанию и по своему методу столь ясно склоняются в эту сторону, что чисто кинетическую разработку явлений можно, пожалуй, признать *физическим идеалом* новейшей физики.

Перемена во взглядах на сущность внутренних процессов в материи, вызванная, прежде всего *волновой теорией света* и в еще большей степени *механической теорией теплоты*, проявилась сначала в том, что все возражения против *атомистического воззрения на материю* умолкли. Если прежде, растворив материю в составляющих ее силах, вопрос о внутреннем ее строении все более отодвигали на задний план, то теперь *Фехнер, Грассман* и другие в ряде обширных углубленных работ показали, что новая физика постоянно требует в качестве основы для своего развития допущения, что материя состоит из абсолютных или относительных отдельных единиц. Вместе с этой *новой атомистикой* и под ее эгидой, благодаря трудам *Кренига, Клаузиуса, Максвелла* и других, возникла чисто кинетическая, чрезвычайно смелая теория новой физики, *механическая теория газов*. Ей удалось то, что до сих пор считалось совершенно невозможным — исчисление *скорости, длины свободного пути* и (хотя бы приблизительно) *величины молекул газов*. Она же, исходя, обратно, из своих допущений о *внутреннем трении, теплопроводности газов* и т. д., сумела получить результаты, хорошо подтвердившиеся на опыте. *Этим для математической физики была завоевана новая область, не уступавшая по своей плодотворности прежним завоеваниям.* Этот первый шаг в область механики атомов тотчас же повлек за собою и второй. Во многих случаях сопоставление результатов теоретических расчетов с данными опыта показало, что допущения *простого* строения материи из абсолютно элементарных атомов недостаточно для объяснения явлений, — что, наоборот, эти атомы следует себе представлять составленными, в свою очередь, из особых частей, из *атомов второго порядка*, и что наряду с движениями молекул следует еще принимать в расчет *интрамолекулярные движения*. Тем самым физика теперь пришла к тому же выводу, который уже раньше и независимо от нее был получен родственной ей наукой — химией, хотя и здесь этот вывод получил всеобщее признание лишь в последнее время. *Таким образом, перед взором физика-атомиста открылась перспектива продолжающейся до бесконечности сложности состава материи, а вместе с тем и бесконечной ее делимости, т. е. непрерывности материи.*

Успехи кинетической разработки теории газов вполне естественно привели к попытке перенести ее и на теорию всякой материи вообще ¹. Для этого, прежде всего, было необходимо

¹ В этом именно смысле У. Томсон, при открытии заседания математико-физической секции Британской ассоциации в Монреале в 1884 г., сказал следующее: „Хорошо известная теперь кинетическая теория газов представляет собою столь важный шаг на пути к объяснению с помощью движения таких

188 ВОЗНИКНОВЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

свести к движению *всеобщее тяготение* и, в частности, силу тяжести. И действительно, вскоре после появления кинетической теории газов, физики стали исследовать все возможные виды внутренних движений с точки зрения их пригодности для этой цели. С одной стороны, в соответствии с волновой теорией света, пытались создать и *волновую теорию тяжести*; с другой стороны, — тяготение пытались объяснить *давлением*, исходящим из всякой весомой материи, распространяющимся во всенаполняющем эфире и передаваемым последним обратно телам. В конце концов, пришли к гипотезе, приближающейся к кинетической теории газов, и стали силу тяжести объяснять, подобно Лесажу, *токами эфира*, пронизывающими пространство во всевозможных направлениях и попадающими на тела со всех сторон. К сожалению, успех не вполне оправдал приложенных усилий. Хотя некоторые из относящихся сюда работ представляют собою очень ценный вклад в разработку данной проблемы, однако ни одна из предложенных теорий не получила всеобщего признания. Можно даже сказать, что в *новейшее время надежды на близкое разрешение этой проблемы скорее понизились, чем повысились*. Но зато *область применения кинетического принципа объяснения к различным проблемам физики постоянно расширяется* и плодотворность этого применения, бесспорно, подтверждает его целесообразность. Многие так называемые *механические* теории, появившиеся в последнее время во всех отраслях физики, в большинстве случаев следовало бы скорее назвать *кинетическими*; если этот характер в них и не вполне выдержан, то указанное направление в них определенно представлено. Вполне естественно, что во всех этих случаях *руководящими стимулами* являются *механическая теория теплоты, кинетическая теория газов и волновая теория света*. Механическая теория теплоты непосредственно побуждала к тому, чтобы все весомые тела рассматривать как системы непрерывно движущихся молекул, и под влиянием этого воззрения учение о молекулярных силах все больше и больше объединялось с учением о теплоте в единую *механику молекул*. Каким образом при этом пришли к *механическому обобщению основных положений теории теплоты* и к *механическому обоснованию ее основных понятий*, было уже изложено выше. Теперь же нам предстоит рассказать о применении кинетического воззрения на материю к учению об *агрегатных состояниях вещества, их превращениях и их взаимодействии*. Так как при этом выяснилось, что все формы материального бытия, в противоположность прежним воззрениям, представляют собою постепенно переходящие друг в друга и не имеющие определенных границ состояния всей материи, то это, естественно, побудило перенести результаты, достигнутые кинетической теор-

свойств тел, которые представляются нам статическими, что едва ли можно удержаться от мысли, что в будущем появится полная теория материи, в которой все свойства последней будут рассматриваться лишь как атрибуты движения* („Nature", XXX, стр. 417, 1884).

ВОЗНИКНОВЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ 189

рией газов в *теории диффузии, внутреннего трения, теплопроводности* и т. д., и на *капельно-жидкие тела*, а частью и на *твердые тела*. Наконец, и основанные в значительной мере на допущении молекулярных сил теории, как *теория капиллярности* и *упругости*, в свою очередь должны были, для объяснения так называемых *последствий*, воспринять *элементы кинетической концепции*. Точно так же и *оптика* добилась своего величайшего достижения, полностью привлекая к себе на некоторое время интерес физики и химии, а именно — *спектрального анализа*, только благодаря тому, что она объединила предпосылки волновой теории с предпосылками механической теории теплоты и *перебросила мост от колебаний эфира к колебаниям материальных молекул*. Результаты этой новой установки сказались не только в том, что новый оптический анализ ознакомил нас с *материальной структурой космических тел*, но также в том, что они дали толчок к созданию *новых гипотез о молекулярном строении тел*.

На той же общей почве выросла и теория поразительного явления, так называемой *аномальной дисперсии*, и даже в области *физиологии органов чувств* кинетика оказалась более плодотворной, чем допущение особых материй, наделенных особыми свойствами. *Физиологическая оптика* уже в предыдущем периоде начала сильно развиваться под влиянием волновой теории света. Теперь же Гельмгольц свел оставшиеся еще до того времени загадочными *различия звуковых тембров, особенности гласных звуков, а также самые основы гармоник*, с их якобы исключительно психическим происхождением, только к особенностям колебательных движений. Наконец, под влиянием общего движения времени и *учение об электричестве* утратило свой специфический электрический характер и явно превратилось в *механику эфирных колебаний*, пытаясь слиться в этой области с оптикой. Потребность в таком преобразовании сказалась с особенной силой для теории *распространения электрических действий на расстоянии*; нельзя, впрочем, не признать, что вопросы о *происхождении электрических явлений* и о *взаимодействии между пондеромоторными и электродвижущими силами*, несмотря на множество остроумных теоретических попыток, встречают еще много трудностей.

О постепенном преобразовании физических дисциплин свидетельствует, наконец, проведение через все области физики абсолютной или, точнее, *механической системы мер*. Правда, в области *оптики* и *акустики* проведение такой независимой от наших чувств механической системы мер осталось еще незаконченной попыткой; но зато в области электричества эта система мер была проведена не только *теоретически*, но и *практически*. Она послужила твердой основой для столь мощного развития в наше время *электротехники*, какое, конечно, было бы невозможно при отсутствии этой основы.

Из совокупности этих новых тенденций все яснее выявляется конечная цель развития физики — создание единой науки, физики,

190 ФИЛОСОФИЯ МАТЕРИИ

как механики всякой материи, как кинетики всех материальных движений, — науки, в которой отдельные дисциплины должны различаться между собою не сами по себе, а лишь по формам нашего восприятия, обусловленного различием наших чувств.

ФИЛОСОФИЯ МАТЕРИИ (приблизительно от 1860 до 1880 г.). Как ни сторонились физики, от какого бы то ни было влияния *философии*, тем не менее, и в это время они не могли совершенно освободиться от косвенного воздействия общих философских идей. Единогласие, с которым философы отрицали атомистическое строение материи, пошатнуло и у физиков твердую веру в реальность атомов. Можно даже сказать, что, невзирая на частные расхождения в других областях, в *теории материи* физики и философы стремились к одной и той же цели. Уже с давних пор и те и другие одинаково стремились полностью растворить всякого рода материи в силах и, таким образом, свести все проблемы материи к одной великой *загадке силы*. С другой стороны, вследствие долгого обращения в этом кругу идей, мысль настолько привыкла к понятию силы, что до известной степени перестала замечать загадочный характер его. В этом именно смысле физику теперь стали определять как «*науку о причинах или силах, обуславливающих явления и изменения в неорганической природе*»¹ полностью оставив материю со всеми ее трудностями родственной науке, химии, которая, конечно, уже не могла обойти проблемы вещества.

Закон сохранения силы сначала как будто бы вполне соответствовал такому воззрению, он даже как будто подкреплял его, так как давал возможность при всяких превращениях по заданной силе заранее определять величину силы, получившейся в результате превращения, не обращая при этом внимания на процессы, происходящие внутри материи.

И нельзя отрицать, что, после того как этот закон был признан бесспорным, подобный прием разработки естественных явлений с его помощью представляется соблазнительно точным. Но, с другой стороны, исследователю все же приходится, в конце концов, обращаться к самому процессу превращения сил, выяснять возможность последнего, отмечать его осуществление при заданных условиях, т. е. в конце концов, возвращаться к материи и притом не к рассмотрению свойственных ей сил, в понятии которых не заключается способности к превращению, а к рассмотрению внутренних движений материи, имеющих место при превращениях. И действительно, одновременно с установлением закона сохранения силы начался и *поворот в сторону материи*.

Когда закон сохранения силы был впервые проверен на процессах *превращения теплоты и механической работы*, пришли к убеждению, что подобное превращение было бы невозможно, если бы теплота не была *явлением движения*, и именно *движения внутренних частей материи*, в том числе и весомых. Но это достижение, завершившее собою предшествующий период физики, очевидно, возвращало ее к вопросу

¹ *Eisenlohr, Lehrbuch der Physik*, 9 изд., стр. 1, Stuttgart 1863.

ТЕОРИЯ БЕЙС-БАЛЛОТА 191

о внутреннем строении и внутреннем движении, одним словом — к вопросу о структуре материи.

Все, что движется вместе, тем самым указывает на известную связь и на известную индивидуализацию; в конце концов, мы иначе, как при посредстве движения, индивидуализации постичь не в состоянии. Движение в материи можно себе наглядно представить лишь при условии, если мы допускаем в ней индивидуализацию, т. е. если мы допускаем, что она состоит из отдельных единичных частиц. Поэтому физик, придя к кинетической теории теплоты и пытаясь вывести большую часть явлений природы из внутренних движений материи, был по необходимости вынужден вернуться к атомистическому взгляду на материю как к единственно возможному, и в этой необходимости он нашел наиболее надежные доводы в пользу реальной действительности атомной теории. А так как и химия, приняв двойное деление материи на молекулы и атомы, теперь снова разрешила все свои загадки на атомистической основе, то в этот период атомная теория представлялась устойчивой и надежной, как никогда раньше. Благодаря этому философия материи обрела новую жизнь, хотя уже и не на чисто философской, а на эмпирической естественнонаучной основе.

Сначала старались, насколько возможно, оставаться в кругу ньютоновских воззрений, пытаясь приспособить старую атомистику с ее атомными силами к новым явлениям. С этой целью Бейс-Баллот, впоследствии известный голландский метеоролог, попытался в большом сочинении 1849 г.¹ доказать возможность существования различных молекулярных сил в единой материи, составленной из атомов. До сих пор, — так начинает свою работу Бейс-Баллот, — принимали два рода атомов: атомы массы и атомы эфира; первым приписывали различные формы, а относительно вторых не делали никаких предположений; но, во всяком случае, они значительно меньше первых; может быть, они бесконечно малы, *может быть, их даже вовсе не существует.* Существование атомов эфира допускали, по-видимому, лишь для того, чтобы ими заполнить пустые пространства между атомами массы и избежать несообразности одновременного существования в одной и той же частице притягательных и отталкивательных сил. Но так как первое этим путем неосуществимо, а несообразность второго несколько не больше, чем допущение двух совершенно различных видов материи, то можно допустить, что каждый атом массы единой материи, притягивая к себе другие атомы, имеет в то же время стремление распространяться, т. е. что в каждом атоме существуют одновременно две силы: притягательная и отталкивательная.

Обе эти силы слагаются в единую силу, которая, в зависимости от различных положений равновесия атомов, для некоторых точек пространства обращается в нуль и при этом меняет свой знак; следо-

¹ „Scheets eener physiologie van het onbewerkte ryk de natuur“, Utrecht 1849. В „Fortschritten der Physik im Jahre 1849“, т. V, сам Бейс-Баллот приводит подробный реферат этой работы — Christoph Heinrich Dietrich Buys-Ballot (1817 — 1891) — профессор математики в Утрехте, позднее директор метеорологического института там же.

192 ТЕОРИЯ БЕЙС-БАЛЛОТА

вательно, если x обозначает расстояние между двумя атомами, эта сила может быть выражена следующей формулой:

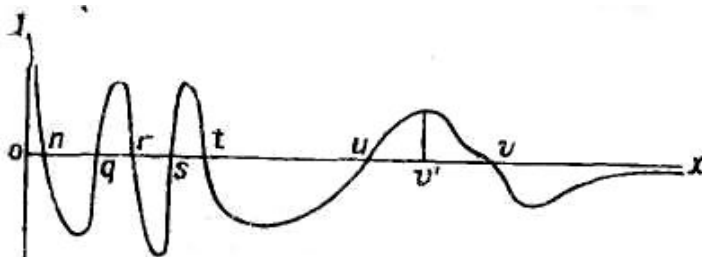
$$f(x) = -\frac{a}{x^2} + \frac{b}{x^3} - \frac{c}{x^4} + \frac{d}{x^5} - \dots \quad 1,$$

где a, b, c, d, \dots — коэффициенты, зависящие также и от формы атомов. На этой зависимости основывается химическое различие веществ. Но на данный атом действует не только один соседний, а все окружающие атомы. Все эти действия опять-таки могут быть выражены следующей формулой:

$$F(x) = -\frac{A}{x^2} + \frac{B}{x^3} - \frac{C}{x^4} + \frac{D}{x^5} - \dots,$$

где величины A, B, C, D, \dots составлены из величин a, b, c, d, \dots и, следовательно, кроме формы атомов, зависят еще от расположения последних. В одном и том же веществе можно наблюдать различные состояния равновесия. В твердом, жидком и газообразном состоянии, а также при бесконечно большом расстоянии между атомами, результирующая сила равна нулю: то же самое, может быть, имеет место и при различных аллотропических модификациях. Тела в состоянии покоя находятся в равновесии, но не сами по себе, а под влиянием соседних частиц; если последние изменяются, то должно измениться и равновесие тел. Если привести в соприкосновение две системы, находившиеся в равновесии лишь под влиянием окружающих их частиц, то равновесие нарушается, и системы приходят в колебания, которые мы воспринимаем как *электричество*; если же колебания достаточно сильны, то частицы одной системы входят в другую, и таким образом колебания могут вызвать *химические* изменения. Изменения равновесия происходят от простого соприкосновения, или под действием света и теплоты, или под действием электричества, а может быть, даже под действием звука; последнее, впрочем, еще не подтверждено наблюдением.

Теплота есть такое состояние, при котором частицы тела находятся в поперечных стоячих колебаниях, а в эфире эти колебания распространяются в виде лучистой теплоты. Интенсивность теплоты пропорциональна живой силе Σv^2 , так как более высокие температуры содержат больше силы, но при этом присоединяются новые колебания с меньшей длиной волны. Постоянные в формуле силы являются, по видимому, линейными функциями температуры. Законы *света* тождественны с законами теплоты, так что для перехода достаточно только заменить названия. *Электричество* заключается в продольных стоячих колебаниях частиц тела; поступательные продольные колебания



Черт. 5.

¹ Приложенный чертеж изображает наглядно форму функции $f(x)$; абсциссы соответствуют расстояниям между атомами; ординаты — величинам сил.

ТЕОРИЯ АТОМОВ ФЕХНЕРА 193

в эфире образуют лучистое электричество. Существует лишь *один вид электричества*; кажущееся же различие двух его видов происходит, может быть, оттого, что в одном из них впереди идет сгущенная, а во втором разреженная сторона волны. Благодаря продольности своих колебаний электричество должно изменять агрегатное состояние тел и производить химические изменения еще сильнее, чем теплота. Движущей силой *гальванического тока* является стремление составных частей жидкости к частицам металла, а регулирующая сила пропорциональна величине нарушенного равновесия во всех местах, где соприкасаются разнородные частицы. При соприкосновении меди с цинком положительная волна идет по цинку, отрицательная — по меди; частицы воды по теории Гротгусса вращаются, и все приходит в состояние колебания. При этом некоторые частицы заходят за пределы своего подвижного равновесия, и тем больше, чем сильнее колебания. Эти частицы тогда соединяются — цинк с кислородом, медь с водородом; но в последнем случае равновесие не наступает, водород выделяется свободным, если налицо нет соли, из которой водород мог бы вытеснить металл. При таком выделении или вытеснении прежнее состояние восстанавливается, и процесс продолжается снова. Таким образом, соприкосновение есть начало, а химическое изменение является причиной происхождения тока, подобно процессу в капиллярной трубке, из которой непрерывно удаляют поднявшуюся жидкость.

Сам Баллот отметил, что его представление о действии сил между материальными частицами, равно как и его кривые величины сил, полностью совпадают со старыми представлениями Босковича ¹. Но подобно тому, как во времена Босковича, так и теперь господствовало мнение, что *дуализм материи*, как причины притягательных и отталкивательных сил, во всяком случае, скорее мыслим, чем совместное существование многих взаимно друг друга уничтожающих сил в единой материи. Но так как никто, в том числе и сам Баллот, не сомневался в том, что отдельные члены $f(x)$ следует рассматривать как особые силы, то теория Босковича-Баллота была оставлена без внимания.

Не столько с целью новых открытий в области атомистики, сколько с целью теоретического ее обоснования, — с целью доказать, что при современном состоянии естествознания она представляет собою единственное возможное воззрение на материю, — Фехнер выпускает сочинение «Теория атомов» (1855 г.) ², в котором обращается преимущественно против философских противников этой теории, полагая, что именно благодаря им она даже у натуралистов не получила того полного и всеобщего признания, которого она заслуживает. В предисловии к первому изданию этого сочинения Фехнер говорит: «Если бы мне настоящим изложением удалось вырвать из когтей философии хотя бы

¹ См. настоящую работу, ч. II, стр. 306. Такие же воззрения на силы материи отстаивал и Джузеппе Белли (Giorn. di fisica di Pavia, 1814).

² „Die physikalische und philosophische Atomenlehre“, Leipzig 1855, 2-е издание, 1864. Gustav Theodor Fechner (1801 — 1887) — с 1834 до 1839 г. профессор физики в Лейпциге; с 1839 до 1843 г., вследствие тяжелой болезни глаз, прекратил научную деятельность; затем, после выздоровления, — профессор натурфилософии и антропологии в Лейпциге.

194 ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АТОМИСТИКИ ФЕХНЕРА

одну душу, готовую низвергнуться вместе с ней в ту темную бездну умствований, где раздается лишь рев и скрежет зубовой, где каждый восстает против каждого, то я уже считал бы свой труд не потерянным».

Фехнер принимает, что *всякая материя как весомая, так и эфир, т. е. что «субстрат движений, обуславливающих явления света, лучистой теплоты, магнетизма и электричества (вероятно, общий)»*, состоит из атомов. Неопровержимые доводы в пользу такого допущения он видит, прежде всего, в явлениях *света и теплоты*. *Волновая теория света* необходимо требует атомного состава, как для весомой материи, так и для эфира. «С давних уже пор наиболее глубокие математики и физики признавали, что *дисперсия света* совершенно несовместима с волновой теорией; и это было единственной причиной, почему несравненно менее вероятной и ныне по неопровержимым основаниям окончательно покинутой теории истечения столь долго отдавалось предпочтение перед волновой теорией. Но вот теперь более новые исследования Коши показали, что указанная несовместимость имеет место лишь при условии, если принять, что световая волна распространяется в эфире, как в непрерывной среде, что, наоборот, законы дисперсии вместе с законами преломления вполне последовательно вытекают из основных положений волновой теории, если принять, что частицы эфира дискретны; больше того, в этом последнем случае дисперсия представляется столь же необходимой, как и преломление. Таким образом, вопрос, за или против атомизма, является вопросом жизни для волновой теории, подобно тому, как вопрос, за волновую теорию или против нее, есть вопрос жизни для физики». Подобно дисперсии и *поляризация света* объяснима только на основе атомистики; поляризация требует для своего объяснения поперечных колебаний эфира. Но спор между Френелем и Пуассоном ясно показал, что в непрерывной среде все поперечные колебания должны очень быстро прекращаться и переходить в продольные, тогда как в среде, состоящей из отдельных частичек, они могут распространяться дальше. После этого Пуассон провел все свои исследования по упругости, капиллярности и теплоте в атомистическом направлении, а в разработке оптики на подобных основаниях ему помешала только смерть. Подобно оптике и *термотика* необходимо требует атомистики. «Явления распространения тепла в телах и теплового излучения очень непохожи друг на друга. Там тепло медленно пронизывает тела, следуя, по-видимому, особым законам, здесь же оно распространяется со скоростью, сравнимой со скоростью света, и по таким же законам, как свет. Тем не менее, оба вида распространения должны подчиняться общим законам теории теплоты. Это и было доказано Фурье, показавшим, что законы проводимости теплоты вытекают из законов излучения, если весомые тела представить себе состоящими из отдельных частичек, излучающих тепло друг к другу». И закон синусов в излучении теплоты является только «естественным следствием наложения тел из атомов; наоборот, на основе непрерывности материи не существует надежных физических обоснований для этого закона». Другой род доводов Фехнер находит в необходимой причинной *связи между магнитными и электрическими*

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АТОМИСТИКИ ФЕХНЕРА 195

явлениями. Многообразные явления, являющиеся общими для магнитов и для электродинамических соленоидов, требуют общего пояснительного начала для магнетизма и электричества. Таковым является давно уже общепризнанная теория Ампера, которую следует понимать так, что круговые электрические токи обтекают не магнит в целом, а отдельные его частицы. Частицы же эти, «вокруг которых текут электрические токи, нельзя себе представить иначе, как в атомистическом смысле, ибо в сплошной массе проводящего железа, как его себе представляет сторонник динамической теории, существование отдельных круговых токов вообще невозможно, как бы ни смотреть на сущность электричества». В пользу атомистического представления о том, что магнит состоит из элементарных магнитов, говорят, далее, изменения магнетизма в магните от кручения, от звуковых колебаний и т. д.

В качестве дальнейшей группы фактов, говорящих в пользу атомистики, Фехнер приводит *общую связь всех так называемых молекулярных явлений.* «С представлением о дискретных частицах тела сразу появляется возможность различия в расстояниях между ними, попеременного их сближения и удаления, различного расстояния в различных направлениях, различной группировки; возможность изменения отношений сил в зависимости от расположения и расстояния частиц и вытекающие отсюда положения устойчивого и неустойчивого равновесия; наконец, возможность переходов из одного положения устойчивого равновесия в другое, а также постоянных перемещений частиц друг относительно друга. Совокупность этих возможностей мы видим осуществленной в цикле явлений, из которых каждое в отдельности могло бы, конечно, быть объяснено и иным путем; но взятые вместе они составляют как бы лучи единой звезды атомистики, в основной идее которой они только и находят свой центр и связь, так как там содержатся различия, изменения, переходы плотностей, строения и агрегатных состояний тел, слоистость и вообще различие свойств кристаллов в различных направлениях, упругость и переход через предел упругости, непрерывные органические движения. С этой совокупностью явлений весомого теснейшим образом связана рассмотренная выше совокупность явлений невесомого, а с этой общей совокупностью связана совокупность химических явлений. В самом деле, с дискретностью частиц дана также возможность того, что частицы одних тел проникают в промежутки между частицами других тел, что они выходят отсюда неизменными, что одни и те же составные части группируются различным образом и что каково бы ни было соотношение сил между различными атомами, — состояние устойчивого равновесия между последними возможно не иначе, как при равном распределении сил между ними; здесь мы имеем растворение, соединение, разложение, постоянство весовых отношений, изомерию, включая метамерию и полимерию, — выведенные из того же простого основного представления, которое связало воедино указанные выше физические отношения весомого и невесомого».

Из случаев *изомерии* Фехнер, в частности, приводит один пример, который является прекрасным свидетельством пояснительной способ-

196 НЕПРЕРЫВНОСТЬ МАТЕРИИ

ности атомной теории. Бывают «случаи изомерии, при которых изомерные модификации одного и того же вещества физически и химически абсолютно ничем не отличаются друг от друга, кроме: 1) невозможности совместить путем наложения их, в остальном совершенно одинаковые (гемиздрические), кристаллические формы; в этом отношении они ведут себя совершенно так же, как перчатки с левой и правой руки, которые при полном в остальных отношениях равенстве невозможно совместить, и 2) вращения плоскости поляризации света в противоположных направлениях, вправо и влево, при полном равенстве отклонения в ту и другую сторону, как действуют; например, вращающая вправо и влево виннокаменная кислота, а также ее соединения... Как представляет себе причину этих явлений сторонник динамической теории? Он по обыкновению никак себе его не представляет, он ограничивается лишь словами... С атомистической же точки зрения легко понять, что между различными возможными построениями тел из молекул данной формы существуют и такие, когда молекулы в двух телах, при полном тождестве своих свойств, относятся друг к другу, как правая и левая перчатки или правая и левая руки, что одно тело состоит, так сказать, исключительно из правых рук, а другое из левых, одинаковые стороны которых расположены одинаковым образом, представляя, таким образом, противоположно устроенные системы. При таком предположении сразу становятся почти сами собою понятными те различия, которые выявляются на вращающей вправо и влево виннокаменной кислоте»¹.

Принятие атомистики Фехнер считает для физика прямо обязательным; но и для *философов* не остается поводов оспаривать ее, так как все философские основания, которые до сих пор приводились против атомистики, относились вовсе не к физической атомной теории, а к философской атомистике собственной фабрикации. Физик вовсе не утверждает, что атомы абсолютно неделимы, как это всегда указывает философ. «Все, чего требует физик-атомистик, — это дискретные, неделимые дальше для нас конечным образом массы, на которые распадаются тела, или, ближайшим образом, молекулы тела; до вопроса же, делимы ли сами по себе атомы и дальше, ему, как сказано, нет никакого дела. Возможно, что здесь повторяются те же отношения, какие существуют между космическими телами: по отношению друг к другу они являются настоящими атомами, потому что нет таких сил, которые могли бы перенести что-нибудь с одного светила на другое, а между тем сами по себе они делимы... Точно так же физик не может взять на себя смелость утверждать, что пространство между его атомами абсолютно пусто и не наполнено тонким непрерывным веществом, не имеющим, однако, влияния на те явления, которые доступны его исследованию ... Да и между дискретными атомами эфира, необходимыми еще физики для объяснения световых явлений, мог бы

¹ Эту мысль чрезвычайно плодотворно применили, начиная с 1875 г., химики ле-Бель и вант-Гофф к тождественным по своей структуре, но оптически различным соединениям (см. также Wislicenus, „Tageblatt der 60 Naturforscherversammlung“, стр. 53, Wiesbaden 1887).

АТОМЫ И МОЛЕКУЛЫ 197

согласно его опытам и исчислениям существовать еще более тонкий непрерывный эфир; но физик не говорит о таких возможностях, которые для него безразличны, так как они ему ничего не дают. Если же они могут что-нибудь дать философу, — то это его дело заниматься ими ... Физик атомы нужны для начала, а не для конца. *Если философ предоставит физике его атомы вначале, то последний охотно предоставит под конец первому его заполненное пространство; одно не противоречит другому».*

Надежным основанием для физической атомистики являются, по мнению Фехнера, следующие положения: «Весомую материю следует себе представлять пространственно разделенною на дискретные части, между которыми находится невесомое вещество (эфир); о природе этого последнего и его связи с весомой материей, правда, существует еще во многих отношениях неуверенность, но, во всяком случае, эфир следует себе представлять совершенно так же, как и весомую материю, локализованным пространственно и разделенным на дискретные части, между которыми находятся либо абсолютно пустое пространство, либо же только нечто такое, что философия может принять в угоду своей идее о заполненности пространства, но что уже не имеет никакого влияния на физические явления и, следовательно, может быть оставлено физиками без внимания... Последние атомы либо сами по себе неразрушимы, либо, по крайней мере, в области физики и химии не существует средства для их разрушения, и нет оснований допускать, чтобы такое разрушение или же разжижение стало когда-нибудь возможным. Большие или меньшие количества таких атомов в области весомого соединяются в маленькие группы (так называемые молекулы или сложные атомы), которые находятся на большем расстоянии друг от друга, чем атомы в каждой группе; эта система степеней может быть продолжена, так что меньшие группы в свою очередь могут соединяться в большие ... Идя в обратном порядке, можно сказать, что тела, вообще говоря, могут быть разделены на большие и меньшие группы частиц вплоть до последних атомов, из которых, однако, первые могут быть разрушены, последние же нет. О взаимном расстоянии между последними атомами известно только, что оно очень велико по сравнению с размерами самих атомов. Об абсолютных же размерах атомов и даже о том, имеют ли они поддающиеся измерению размеры, — ничего не известно. Молекулам или сложным атомам можно приписать некоторую определенную форму в виде очертания охватываемой ими группы, о форме же последних атомов ничего не известно. Силы атомов являются частью притягательными, частью отталкивательными; по крайней мере, до сих пор их еще не удалось свести к одним только притягательным силам. Их действия являются функциями расстояний частиц. Точный закон этих сил неизвестен ... Что касается строения эфира в мировом пространстве и, в особенности в телах, то он, как уже сказано, подобно весомым телам состоит из частиц, находящихся на некоторых расстояниях друг от друга. Эти расстояния столь велики, что размеры частиц исчезают по сравнению с ними. Тяжестью эфира, если она существует, можно пренебречь во всех световых явлениях по сравнению с другими силами, от которых

198 ПОНЯТИЕ СИЛЫ

эти явления зависят, так что в этом отношении эфир можно считать невесомым. Хотя он и не совсем несжимаем, однако его частицы могут несравненно легче перемещаться друг относительно друга, чем сближаться между собою под влиянием сжатия. Он обладает совершеннейшей упругостью, т. е. сила, с которой атом эфира, выведенный из своего положения равновесия (положения покоя), стремится возвратиться в это положение, строго пропорциональна отклонению от положения покоя... В телах различной структуры плотность и упругость эфира различны».

Нет нужды входить в дальнейшее рассмотрение этих положений, которые были выведены в результате борьбы мнений Фехнером, проявившим при этом верный взгляд и правильное понимание всесторонне образованного физика и философа; они до сих пор служили и, вероятно, в дальнейшем останутся основами для наших воззрений. Но, с другой стороны, некоторые последующие главы, в особенности глава, посвященная *понятию о силе* и его отношению к понятию о материи, а также глава о сущности атомов, характерны для воззрений того времени. Физик, считающий излишним знакомиться с историческим развитием своей науки, полагая, что изучение истории является бесполезной тратой времени, которая в крайнем случае, допустима лишь в науках, застывших в своем развитии, — приходит к такому убеждению, надо думать, под влиянием того мнения, будто все труды прежних физических эпох непригодны для нынешней и сами по себе слабы, между тем как, начиная с нового времени, когда уже были установлены важнейшие основания науки, эти последние оставались все время неизменными. О том, в какое время произошел такой поворот, начиная ли с Галилея или Ньютона, или же только в текущем столетии, в этом он обыкновенно не отдает себе отчета. А между тем изучение каждой более старой работы, которая была посвящена рассмотрению основных воззрений, показывает нам, что развитие науки продолжалось непрерывно все время и что и в текущем столетии состояние науки тоже все время изменялось.

При исследовании отношений между понятиями о силе и материи Фехнер, прежде всего, полемизирует против *динамического* понимания материи, исходящего от Канта, согласно которому материя могла бы быть построена на столкновении противоположных сил — притягательных и отталкивательных. «Физика требует, — говорит Фехнер, — центров для силы, которые сами по себе не могут быть рассматриваемы как силы; поэтому необходимо постараться возможно полнее выяснить значение этого различия материи и силы, а не стирать его. Динамическое воззрение до сих пор не было в состоянии достигнуть этого в такой мере, чтобы физика могла этим воспользоваться, чтобы установилось единогласие между самими философами и была осуществлена связь с живой обыденной речью». Несмотря на это, и у самого Фехнера понятие о силе остается в сущности тем же, каким оно было у ньютоновской школы, а потом и у философов-динамиков. Правда, Фехнер пытается вернуться непосредственно к *более осторожному воззрению самого Ньютона* и избежать последующего догматизма его учеников. Он не определяет силу, подобно этим последним, как непосред-

ПОНЯТИЕ СИЛЫ 199

ственное действие материи на расстоянии; напротив, подобно Ньютону, он старается выразить силу только при помощи закономерных движений тел при взаимном их сближении или удалении. *«Сила заключается, — так выражается Фехнер, — в закономерном соотношении материй».* *«Сила для физика вообще есть не больше, чем вспомогательное выражение для изложения законов равновесия и движения, имеющих место, когда материя противостоит материи.* Выражение «между солнцем и землею действует сила взаимного притяжения» означает не больше, чем следующее: солнце и земля, противостоя друг другу, движутся друг относительно друга по определенному закону; физику о силе известен только закон; ничем другим он не в состоянии ее охарактеризовать». Однако это воззрение у Фехнера все-таки фактически проведено довольно слабо, и в большинстве случаев, естественно, у него просто сохраняются прежние ходячие представления. Фехнер считает совершенно неправильным представление, будто сила, подобно свету, распространяется из определенных заданных точек. «Бесспорно, уменьшение силы тяготения, электрической и магнитной силы, в обратном отношении к квадратам расстояний не только чрезвычайно подходит к этому представлению, но и составляет его главную опору. Но сила не требует времени для своего распространения, так как закон его не требует, для света же время для этого требуется; уже здесь аналогия становится несостоятельной. Да если бы она даже и могла быть проведена далее, то и тогда физик практически не вывел бы ничего из того, что «нечто» распространяется между данными веществами; все, что могут дать ему силы, он извлекает из законов движения материй, между которыми распространяется это «нечто»; при этом распространяющееся между ними «нечто» остается пустым названием, хотя бы мы и заменили это название словами толчок, импульс, побуждение». Отсюда Фехнер приходит к представлениям о действии силы, совершенно сходным с теми, которые уже были развиты Босковичем и в последнее время Бейс-Баллотом; он только находит самостоятельные изменения силы в известных точках невероятными. Он пытается найти причину этих превращений не в одной силе, а в совместном действии многих сил, и принимает, что сила, действующая в комбинации точек, пропорциональна произведению всех возрастающих от точки к точке расстояний¹. Этот закон силы заключает в себе закон Ньютона для

¹ „Atomenlehre“, стр. 207. „В каждой комбинации любого числа частиц действует сила, которая по величине и направлению вполне определяется расположением всех составляющих частиц и выражается в том, что скорости всех частиц одновременно возрастают или убывают пропорционально величине этой силы в направлении ее действия. По величине эта сила обратно пропорциональна произведению квадратов всех расстояний, какие можно взять от каждой частицы ко всем остальным. Как сила притягательная она побуждает все частицы двигаться к их общему центру тяжести; как сила отталкивательная она стремится, наоборот, удалить их от общего центра тяжести, — то или другое, в зависимости от того, является ли вышеуказанное произведение отрицательным или положительным. Распределение действия этой силы на отдельные частицы, или движение отдельных частиц под действием этой силы, происходит таким образом, что при этом выполняется принцип сохранения центра тяжести, в силу которого частицы, считая от положения покоя, стремятся к центру тяжести или от него со скоростями, прямо пропорциональными их расстояниям от центра тяжести“.

200 АБСОЛЮТНО ПРОСТЫЕ АТОМЫ

случая действия двух частиц; но так как при своей сложности он мало обратил на себя внимания со стороны физиков и еще меньше подвергся проработке с их стороны, то мы и не будем на нем дольше останавливаться.

В своих исторических замечаниях Фехнер не упоминает — и это одна из самых любопытных сторон его сочинения — о несомненных атомистах, если только они находятся вне области ньютоновского воззрения на силу. Следует ли Декарта наряду с Лейбницем приводить в числе атомистов, в этом можно сомневаться, хотя система декартовых элементов так же атомистична, как и учение последнего о монадах. Но то обстоятельство, что в сочинении, где приведены все возможные доводы приверженцев атомистики, начиная с Босковича вплоть до новейшего времени, ни разу не упоминается, ни имя, ни система Лесажа, ясно показывает, что физики того времени продолжали еще оставаться в пределах ньютоновского воззрения на силу, и позволяет судить, *насколько, в общем, тогда еще были далеки от мысли об удалении из области физики всех элементарных сил и как вообще старательно отклоняли от себя мысль — рассматривать в физике только движения, без всякого отношения к гипотетическим элементарным силам.* И в полном соответствии с этим следует, пожалуй, еще отметить, что и в сочинении Фехнера закон *сохранения силы*, хотя и упоминается несколько раз, однако играет только *подчиненную* роль.

Теория атомов Фехнера представляет в некоторых отношениях двойственность; по отношению к строению материи она является законченной, и в этом отношении она даже для нас остается еще поучительной; но с точки зрения ее воззрения на силу она принадлежит целиком к старой школе и не обращает никакого внимания на выявившиеся уже следы других воззрений. Напротив того, в последней философской части своего труда Фехнер снова очень подробно занимается вопросом о конечном строении атомов, о котором именно в то время появилось множество сочинений. Он решился принять атомы за простые образования, «которые занимают только место, но не имеют никакого протяжения, а между тем, благодаря своим взаимным расстояниям, способны создавать системы, имеющие протяжение». «Эти простые образования можно назвать, — говорит он, — материальными точками, центрами сил, точечными интенсивностями, субстанциальными единицами, простыми реальностями, монадами, — название в данном случае безразлично. Но их природа, значение, содержание, применение и проявление определяются тем и только тем, что они являются пределом разложения осязательного и наделенного осязательными свойствами, объективно (чувственно извне) воспринимаемого реального содержания пространства. Их следует определять лишь в таком отношении к данным опыта; поэтому атомы нельзя представлять себе точками вне пределов времени и пространства, следует только иметь в виду, что какими бы малыми мы ни представляли себе эти точки, этого все-таки будет недостаточно». В пользу такой простой атомистики Фехнер ссылается еще и на то обстоятельство, что уже раньше его многие достойные уважения физики и математики, в особенности иностранцы, как Боскович, Ампер, Коши, Сеген, Муаньо, Сен-Венан и

АБСОЛЮТНО ПРОСТЫЕ АТОМЫ 201

другие, утверждали о существовании простых атомов; что хотя в Германии возможность таких атомов до настоящего времени допускалась только попутно, но В. Вебер, Гельмгольц, Р. Голе и другие, по-видимому, склонялись к этому воззрению. Даже те из философов, которые присоединились к монадологии Лейбница, относились благосклонно к простой атомистике, и такие лица, как Лотце¹, Макс Дросбах², Герман Лангенбек³ и Фихте⁴, высказывались определенно в пользу этого вида атомистики. Следует, впрочем, по этому поводу отметить, что названные выше философы, как показывают самые заглавия их сочинений, примкнули к атомистике только из *психологического* интереса и для обоснования идеи, что *душа* представляет собою простую, не преходящую монаду⁵, а также, что с того времени физики все более и более отказывались от допущения, что материя составлена из *нематериальных* элементов. Подобно работам названных выше философов, сочинение Роберта Грассмана «Die Lebenslehre oder die Biologie», Stettin 1862 («Учение о жизни или биология») тоже ставит себе конечной целью объяснение одушевленной природы, но оно построено на чисто физическом основании⁶. По мнению Грассмана каждое тело состоит из предельных частей, «которые уже не могут быть дальше разложены на меньшие части того же рода». Так как эти части даже у наших химически простых тел могут быть еще разложены, то Грассман предлагает

¹ „Mikrokosmos“, т. I, Leipzig 1856.

² „Die Harmonie der Ergebnisse der Naturforschung mit den Forderungen des Gemüthes oder die persönliche Unsterblichkeit als Folge der atomistischen Verfassung der Natur“, Leipzig 1858. „Die Genesis des Bewusstseins nach atomistischen Principien“, Leipzig 1860.

³ „Über Atom und Monade“, Hannover 1858.

⁴ „Anthropologie“, 2 изд., 1860.

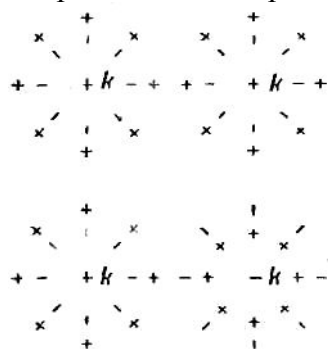
⁵ В заключение и Фехнер в своей атомистике, но только иным образом, переходит в *область психологии*. Возражая против монадологического определения души, он указывает, что последнее не в состоянии доказать бессмертия души, так как оно принимает простоту души именно *ad hoc* (для этого). Он противопоставляет монадологическому взгляду на душу свой собственный, который он называет *синехологическим*. „Он существенно отличается от монадологического взгляда: вместо того чтобы связывать психологическую единицу с отдельными атомами и поэтому видеть столько же душ в мире (сознательных или бессознательных), сколько существует метафизически или физически отдельных простых телесных атомов, он (синехологический взгляд) соединяет психологическую единицу в высшей и последней ее инстанции с закономерной связью мировых атомов (бог), а второстепенные психические единицы (души животных и людей) — с второстепенными частными системами этой цельной системы“ (стр. 249). Согласно этому взгляду, который вполне согласуется с воззрением Фехнера на сущность силы, живое сознание соединено не с сущностью атомов самих по себе, а с состоянием их движения по законам, в которые до известных пределов можно проникнуть путем опыта. Один из наиболее основных законов Фехнер развил в своих „Elementen der Psychophysik“ (Leipzig 1860), а именно закон о пороге ощущения; согласно этому закону никакое движение, способное вообще повлечь за собою осознанное ощущение, не в состоянии вызвать последнего до тех пор, пока оно не перейдет известной степени живости или силы, так называемого порога ощущения.

⁶ Robert Grassmann, брат Herm. Günther Grassmann, книгопродавец в Штеттине.

202 АТОМНАЯ ТЕОРИЯ Р. ГРАССМАНА

для них название «*зерно*» вместо обычного выражения атом. Каждое простое, несложное зерно отличается от точки пространства только тем, что ему присущи силы, Сложное же зерно может иметь несколько центров сил, которые различно расположены и имеют также различный вес.

Все силы действуют обратно отношению квадратов расстояний и являются частью притягательными, частью отталкивательными. Согласно роду этих сил следует также различать и *двоякого рода точки сил*. Те из последних, которые обладают только притягательными силами, называются *телесными точками* и составляют основу весомой материи. Но наряду с ними существуют и такие точки сил, которые проявляют одновременно и притягательные и отталкивательные силы. Эти точки сил, которые Грассман называет *э-точками* (Erpunkte), в свою очередь делятся на две группы таким образом, что э-точки одной и той же группы взаимно отталкиваются, а э-точки, принадлежащие к различным группам, взаимно притягиваются; поэтому Грассман их делит на *положительные*, или *эр-точки* (Erpunkte), и *отрицательные*, или *зи-точки* (Siepunkte). Сила телесных точек называется *тяготением*, сила э-точек — *э-силюю* (или *электричеством*). Э-точки существуют только попарно и притом так, что всегда две из них, вращающиеся одна около другой наподобие двойных звезд, соединяются в *одну э-пару*. Э-пары на больших расстояниях не производят на телесные точки ни притяжения, ни отталкивания, так как их противоположные силы взаимно нейтрализуются, следовательно, они *невесомы* и образуют массу *мирового эфира*. Но на молекулярных расстояниях телесные точки и э-пары действуют друг на друга и притом так, что каждая телесная точка одну э-точку (ближайшую) притягивает сильнее, а другую отталкивает слабее и что, следовательно, между телесными точками и э-парами всегда существует избыток силы притяжения. *Зерна (атомы) состоят из телесной точки и окружающей ее атмосферы гомологично расположенных э-пар*. Но так как и телесные точки, по своему отношению к э-точкам представляют два вида и притягиваются или отталкиваются положительными или отрицательными э-точками, то следует еще различать *положительные* или *отрицательные* зерна, крайний внешний слой которых образуется положительными или отрицательными э-точками (см. черт. 6). Э-пары взаимно отталкиваются или притягиваются, в зависимости от их положения, в обратном отношении к биквадратам, а телесные точки притягиваются в обратном отношении только к квадратам расстояний. А так как при взаимодействии зерен на малых расстояниях их атмосферы находятся значительно ближе друг к другу, чем зерна, то из этого следует, что при сближении однородных зерен отталкивательная сила одинаково направленных э-пар должна возрастать гораздо сильнее, чем сила взаимного притя-



Черт. 6.

жения телесных точек, и что этим и обуславливается известное положение равновесия зерен.

Притяжение, имеющее место между разнородными зернами, усиленное благодаря притяжению противоположно направленных э-пар, называется *химическим сродством*. При наибольшем сближении, при прикосновении или трении, разнородные зерна обмениваются своими э-точками таким образом, что отрицательные собираются на одном ядре, а положительные на другом, вследствие чего освобождаются особые э-силы (или электричества). Подобно однородным или разнородным зернам, э-токи (эфирные токи) тоже притягиваются или отталкиваются, в зависимости от того, направлены ли они в одну сторону или в противоположные. *Магнетизм* происходит вследствие того, что в зернах э-точки вращаются около центра тяжести телесных точек. *Теплота* состоит из колебаний целых зерен, *свет* — из колебаний э-пар.

Как видим, Грассман с еще большею определенностью, чем Фехнер, пытался трактовать атомистику чисто динамически и все вещества выразить в силах; но для этого ему приходится сконцентрировать в одной точке разнообразнейшие силы. Положительная телесная точка притягивает отрицательную э-точку, отталкивает положительную и при этом действует еще притягательно на всякую другую телесную точку, независимо от того, относится ли эта последняя к э-точкам совершенно так же или прямо противоположно. Однако необходимость столь сложного механизма действий, которые исходят от одной и той же точки, не содержащей в себе ничего определенного и даже совершенно не поддающейся какому-либо определению, не могла быть на пользу динамической атомистике, а скорее пробудила потребность в *кинетической атомистике*, которая постепенно и стала выдвигаться на первый план — по мере того, как стали больше заниматься механической теорией теплоты¹.

Поворотный пункт в этом отношении представляла уже работа Вильгельми от 1851 г. «*Versuch einer mathematisch-physikalischen Wärmetheorie*» («Опыт математико-физической теории теплоты»)². Вильгельми сохранил допущение, что притягательные и отталкивательные силы сосредоточены на *двух различных материях*, но в большей степени, чем динамические атомисты, настаивал на влиянии структуры телесных частиц и на влиянии всех соседних частиц на характер действия силы. «Под материей мы понимаем, — говорит он в своем сочинении, — совокупность всего существующего в пространстве. Но материя существует только, поскольку она производит некоторое действие, причем это действие может быть только взаимным между ее частями... Так как материя не может быть количественно ни увеличена, ни уменьшена, то между ее частями возможно только такое взаимодей-

¹ Сам Грассман, несмотря на множественность допущенных им сил, применял еще и кинетический момент для построения э-пары, точки которой, благодаря их силам притяжения, должны были бы сталкиваться, если бы они, подобно планетам или двойным звездам, не удерживались на своих орбитах силою движения.

² Ludw. Ferd. Wilhelmy (1812—1864) — сначала аптекарь в Штаргарде, потом приват-доцент в Гейдельберге; с 1854 г. занимался научными исследованиями в качестве частного лица в Берлине.

204 ТЕОРИЯ МАТЕРИИ ВИЛЬГЕЛЬМИ

ствие, которое вызывает перемещение... Так как, далее, относительное перемещение точек может быть только двоякого рода, а именно, такое, при котором их взаимное расстояние увеличивается или уменьшается, то возможны только два класса элементов материи: взаимно отталкивающиеся и взаимно притягивающиеся. *Следовательно, должны быть допущены двоякого рода точки сил, образующие материю: отталкивательные (эфирные атомы) и притягательные (атомы масс)*... Но материя существует не в своей абстракции, а только как определенная материя... Элементы этой качественно, т. е. химически, определенной материи называются *молекулами*. Различную степень способности к действию они обязаны различию своего строения; *именно, атомы масс соединены с атомами эфира в молекулы; как таковые они и образуют качественно (химически) определенное целое путем сочетания в различных отношениях притягательных и отталкивательных силовых точек*. Эти молекулы распределены в среде, эфире, который состоит только из отталкивательных силовых точек, поэтому мы можем рассматривать молекулы как окруженное и пронизанное эфиром созвездие атомов масс... Полное действие сил такой системы атомов, т. е. молекулы, можно рассматривать как исходящее из центра действующих в ней сил; следовательно, молекулярные центры можно рассматривать как центры сил, которым присущи в одно и то же время притягательное и отталкивательное действия... Величина результирующего действия молекулы зависит: 1) от сочетания в различных отношениях входящих в ее состав силовых точек, т. е. от химического качества... и 2) от распределения и расположения силовых точек... Равнодействующая сил одной молекулы действует на соседнюю молекулу не только как на целое, но и на составляющие ее атомы; таким образом, молекулы индуцируют друг друга, т. е. они взаимно обуславливают расстояния входящих в их состав атомов от центра сил в молекуле... Величина индуктивного действия зависит от качества и расстояния окружающих молекул. Если индуцирующее действие одинаково по всем направлениям, то и распределение силовых точек в молекуле однородно, а, следовательно, и исходящее из нее результирующее действие по всем радиусам одинаково; в этом случае молекула находится в состоянии *электрического равновесия*. Но если однородность окружения каким-либо образом нарушается, то распределение силовых точек в молекуле становится неоднородным, молекула неоднородно индуцируется или поляризуется и оба электричества, как обычно выражаются, становятся в ней свободными. Молекула может быть поляризована *тройким образом*:

- 1) *механически*: когда по одному и тому же направлению против одной молекулы расположены однородные, но не равноотстоящие молекулы;
 - 2) *химически*: когда по одному и тому же направлению против одной молекулы расположены качественно различные молекулы;
 - 3) *электрически*: когда против нее по одному и тому же направлению расположены электрически разнородные молекулы...
- Благодаря силам, с которыми они действуют взаимно друг на друга, молекулы находятся в постоянном движении, колеблясь около положения покоя*. При более глубоком исследовании следовало бы принимать во внимание и движения внутри самой молекулы, т. е. колебания атомов, которые должны про-

ТЕОРИЯ МАТЕРИИ ВИЛЬГЕЛЬМИ 205

исходить вследствие изменения индукции; однако до сих пор довольствовались первым приближением и принимали во внимание только изменение места центров молекул. *Тела существуют в пространстве только благодаря движению своих молекул.* Момент творения наступил тогда, когда на созданную без сомнения этим актом материю (так как материя немыслима без силы) была перенесена эквивалентная ее движению сумма силы, которая в вечном круговороте, проявляясь то в той, то в другой форме, распространяется во всем материальном мире»¹.

После этих общих рассуждений Вильгельми переходит к их применению к *теории теплоты*, в основание которого он кладет следующие определения. *«Под теплотой понимают эффект, зависящий от скорости колебания молекул. Абсолютная теплота молекулы пропорциональна квадрату скорости, с которой она проходит через положение равновесия. Температура тела пропорциональна или равна живой силе его колеблющихся молекул... Повышение температуры происходит, когда вследствие передачи живой силы увеличивается та живая сила, которая уже действует в молекулах тела».* Мы не будем, однако, здесь вдаваться в изложение математического вывода эмпирических законов из предыдущих общих положений, так как оно не имело никаких прямых последствий и едва ли принесло какие-либо плоды. Во всяком случае, за Вильгельми остается та заслуга, что он уже в начале пятидесятых годов, по меньшей мере, поставил наряду с влиянием молекулярных сил действие молекулярных движений и построил материю, по крайней мере, в идеале, не на, силах, а на движении. Что это было сделано не бессознательно, а, наоборот, с ясным пониманием направления научного развития, в этом можно убедиться из слов, которыми Вильгельми заканчивает введение к своему сочинению: *«Если бы мне удалось выявить основную мысль, которая здесь заключается, то этим был бы сделан еще шаг вперед к конечной цели естествознания, к которой мы, хотя и медленно, но в новейшее время непрерывно и очень заметно приближаемся, а именно, к решению задачи — свести все процессы в природе к движению и все причинное в явлениях к передаче и сохранению живой силы»*².

¹ „Vers. einer math.-phys. Wärmetheorie“, стр. 7—17, Heidelberg 1851.

² На аналогичных принципиальных основаниях, как Грассман и Вильгельми, но только несколько менее кинетически и больше динамически, по крайней мере, по сравнению с последним, пытался в 1857 г. построить теорию материи Ф. Редтенбахер (1809—1863), директор политехнической школы в Карлсруэ („Das Dynamidensystem, Grundzüge einer mechanischen Physik“, Mannheim 1857). Согласно его теории материя состоит из *тяжелых телесных атомов*, которые на измеримых расстояниях притягивают друг друга по закону Ньютона, а на очень малых расстояниях — в значительно сильнее возрастающем отношении — и из *невесомых атомов эфира*, отталкивающих друг друга и испытывающих притяжение со стороны телесных атомов. Если расстояние между двумя телесными атомами принять достаточно большим по сравнению с их размерами, а указанное притяжение между телесными и эфирными атомами — достаточно сильным, то эфир будет располагаться вокруг телесных атомов наподобие атмосферы, тогда как пространство между эфирными оболочками останется совершенно пустым. Такие телесные атомы с эфирными атмосферами называются *динамидами*. Между разнородными телесными атомами имеют место еще особые химические притягательные силы, благодаря которым многие простые динамиды

206 УЧЕНИЕ О ТЕПЛОТЕ И МЕХАНИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ГАЗОВ КРЕНИГА

Но Вильгельми, по-видимому, не предчувствовал, что дальнейший значительный шаг по направлению к этой цели лежал довольно близко. В самом деле, если тепловое движение есть колебательное состояние частиц, которое с повышением температуры может беспредельно усиливаться, то неизбежно мыслима и такая температура, а вместе с нею и такое состояние вещества, при котором молекулы под влиянием тепловых движений совершенно выводятся из сфер взаимного их действия, вследствие чего молекулярные силы перестают действовать. Но различные свойства газов, в особенности одинаковый коэффициент расширения, одинаковая объемная теплота и т. д., позволяли думать, что в газах это состояние уже наступило, что их молекулы уже перестали колебаться около некоторого определенного положения равновесия и что, будучи свободны от всякого притяжения и отталкивания соседних молекул, они движутся в пространстве прямолинейно, — по крайней мере, до тех пор, пока непосредственное столкновение с другими частицами не отклонит их от этого направления. Джоуль, как мы раньше указали, в 1851 г. пришел к такому заключению и даже вычислил для водорода скорость *поступательного движения* его молекул ¹. Но теоретически последовательно эта гипотеза свободного прямолинейного движения газовых молекул, механическая или кинетическая теория газов, была разработана немцами, А. Кренигом и Р. Клаузиусом.

А. Крениг в своем сочинении «Grundzüge einer Theorie der Gase» («Основания теории газов») 1856 г. ² указывает на то обстоятельство, что теперь стало общепринятым рассматривать *теплоту* как чистое явление движения, но что в то же время еще не существует ясного представления о *роде этого движения*; поэтому он обещает изложить гипотезу, по крайней мере, для газообразных тел, которая, по его мнению, соответствует всем требованиям ясности и наглядности. Согласно этой гипотезе газы состоят из атомов, которые ведут себя совершенно так же, как твердые идеально упругие шары, и движутся с известными скоростями в пустом пространстве. *Такой атом газа не колеблется около некоторого положения равновесия, но движется по прямой линии с постоянною скоростью до тех пор, пока он не столкнется с другим атомом газа или с твердой или жидкою стенкою, которые ведут себя при этих столкновениях тоже как совершенно упругие тела. Взаимодействие между атомами происходит не иначе, как при соприкосновении их на неизмеримо малом расстоянии* ³.

соединяются в одну сложную, которая тогда имеет одну общую оболочку. Вследствие взаимодействия между различными динамидами как ядра, так и их оболочки могут приходить в колебательные и вращательные движения, которые проявляются как *звук, свет, теплота и электричество*. *Тепловые колебания* представляют собою, вероятно, *радиальные колебания*, так как они расширяют вещество. *Электрические и магнитные явления*, которые не вызывают никакого изменения объема, заключаются, вероятно, во *вращательных движениях*.

¹ См. выше, стр. 78—79 настоящей части.

² Извлечение в „Pogg. Ann.“, XCIX, стр. 315.—Aug. Karl Krönig (1822—1879)—преподаватель гимназии в Берлине.

³ Однако, Крениг все же сохранил притягательные и отталкивательные силы материи, действующие, конечно, только на молекулярных расстояниях определенно полемизировал в 1864 г. против Шубича (профессора в Граце),

УЧЕНИЕ О ТЕПЛОТЕ И МЕХАНИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ГАЗОВ КРЕНИГА 207

Для того чтобы из этих допущений вывести механические законы газов, Крениг представляет себе сосуд в виде прямоугольного параллелепипеда с ребрами x , y и z , в котором равные по величине атомы движутся с равными скоростями (для простоты) только по трем направлениям, а именно, параллельно ребрам сосуда. Если обозначить массу одного атома через m , скорость его через c , а число ударов, производимых им в секунду об одну из стенок, через a , то давление, происходящее от этих толчков, составит $p = mca$. Но так как данный атом может встретить ту же стенку во второй раз не раньше чем, отразившись от противоположной стенки, то должны иметь место $a = c/2x$ и $p = mc \cdot (c/2x)$, если атом движется параллельно ребру x . Обозначим, далее, число всех атомов, содержащихся в сосуде, через n ; тогда, при допущении равномерного распределения скоростей, $n/3$ атомов будут двигаться параллельно ребру x и перпендикулярно к стенке yz , а вызываемое этим давление на стенку будет равно $p = mc \cdot (c/2x) \cdot n/3$. На единицу площади это дает давление $p = mc \cdot (c/2x) \cdot (n/3) \cdot (1/yz)$ или, если обозначим объем сосуда xyz через v , мы получим $p = (nmc^2/6) \cdot (1/v)$. Таким образом, система атомов подчиняется закону Мариотта. Так как живая сила mc^2 пропорциональна абсолютной температуре, то предыдущему уравнению можно также дать следующий вид: $pv = const.$ и, чем доказывается и применимость закона Гэ-Люссака к системе атомов. Положим, наконец, что для различных газов $p_1 = p_2$, $t_1 = t_2$ и $v_1 = v_2$, тогда, следовательно, и $n_1 = n_2$, чем подтверждается и закон Авогадро. Подобным же образом Крениг далее показывает, что и согласно его гипотезе давление газа на поверхность земли должно быть пропорционально не температуре его, но и, как для всякого другого тела, массе и ускорению силы тяжести и что объемная теплота для всех газов должна быть постоянной; равным образом из взаимодействия атомов при их столкновении ему удается вывести отклонения от закона Мариотта и Гэ-Люссака-Дальтона, которые обнаруживаются в большинстве газов. Конец работы Кренига посвящен вопросу о передаче движения атомов целым массам, т. е. вопросу о *превращении теплоты в работу* и обратно.

Работа Кренига побудила также и Клаузиуса выступить с изложением своих воззрений на тепловые движения, воззрений, которые у него составились, по его словам, уже со времени появления его первой работы в 1850 г., но опубликование которых он откладывал до настоящего времени, так как они казались ему еще недостаточно разрабо-

который в своем сочинении „Grundzüge einer Molecularphysik“ (Wien 1862) возражал против допущения существования в молекулах отталкивательных сил наряду с притягательными, как содержащего в себе внутреннее противоречие („Pogg. Ann.“, CXXXIII, стр. 299).

208 МЕХАНИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ГАЗОВ КЛАУЗИУСА

таннами. В известном сочинении «Über die Art der Bewegung, welche wir Wärme nennen» («О роде движения, которое мы называем теплотой») ¹ он полностью примкнул к Кренигу в том отношении, что и он приписал свободным молекулам постоянных газов только поступательное движение, но в то же время он тут же отметил, что реальные газы могут только более или менее приближаться к этому идеальному состоянию. Даже для простых постоянных газов он в математических прибавлениях к своему сочинению вычислил живую силу *поступательного* движения молекул равной только 0,6315 всего заключающегося в газах количества теплоты. Он полагал, что эти *отклонения от идеального состояния* могут происходить как вследствие *вращательного* движения газовых молекул, так и вследствие *колебательных движений* внутри молекул ²; он попытался даже по наблюдаемым Реньо отклонениям газов от закона Мариотта точнее определить это состояние движения, но, в конце концов, должен был отказаться от этой работы как безнадежной.

Поэтому Клаузиус в дальнейшем рассматривает только *идеальные* газы, молекулы которых обладают только поступательным движением, — с этой точки зрения он впервые дал свою знаменитую новую теорию *перехода из одного агрегатного состояния в другое*. В *твердом состоянии* частицы колеблются около определенных устойчивых положений равновесия. В *жидком состоянии* такого положения равновесия уже не существует; молекула уже не связана с определенными соседними молекулами и оставляет их под действием сил других молекул; однако поступательное движение еще не настолько велико, чтобы молекулы могли совершенно уйти из сферы действия других частиц. Но это положение имеет силу только для внутренних слоев жидкости; на свободной поверхности могут создаваться благоприятные условия, когда молекула будет отброшена с такой силою, что она выйдет из сферы действия других молекул и будет дальше двигаться прямолинейно. Если пространство над жидкостью ограничено, то оно постепенно заполнится такими молекулами и тогда некоторые из свободных молекул будут попадать в сферу притяжения жидкости и снова возвращаться в жидкое состояние. Но по истечении некоторого времени всегда наступает состояние равновесия между испарением и конденсацией, при котором, как выражаются, пространство над жидкостью насыщено паром. Из этого, в соответствии с фактами, следует, что плотность насыщения

¹ „Pogg. Ann.“, С, стр. 353.

² Клаузиус говорит („Pogg. Ann.“, С, стр. 354): „Прежде всего напрашивается мысль допустить наряду с *поступательным* и *вращательное* движение молекул, так как при всяком столкновении двух тел, если удар не окажется случайно центральным и прямым, наряду с поступательным возникает также и вращательное движение; далее мне представляется, что внутри отдельных, находящихся в поступательном движении масс имеет место также *колебание*. Если даже ограничиться рассмотрением одних атомов масс и считать их абсолютно твердыми, то и тогда не исключена возможность, *что молекула, состоящая из нескольких атомов, не образует уже твердой массы, но что отдельные атомы в ней обладают подвижностью в известных пределах и потому могут колебаться друг относительно друга*“.

должна с температурой возрастать, что при испарении должна исчезать теплота, равно как при конденсации она должна освобождаться, что газовые частицы могут отскакивать от стенки только с меньшей скоростью и, следовательно, температура пара должна понижаться, — когда одна из стенок сосуда отступает и пар совершает при этом работу, и т. д. Но по отношению к *связи между расширением и механической работой* следует проводить различие между парами и идеальными газами. У первых, даже при отсутствии всякой внешней работы, для каждого расширения (в безвоздушном пространстве) следует преодолевать притяжение, действующее между молекулами, и, следовательно, совершать внутреннюю работу, тогда как идеальные газы могут изменять свой объем только вследствие силы инерции их молекул, не производя при этом никакой внутренней работы. Так как различные газы при одинаковой температуре и при одинаковом давлении, даже вступая в соединение, не изменяют взаимно своего состояния движения, то следует допустить, что отдельные молекулы всех газов по отношению к поступательному движению обладают одинаковой живой силой. Но отсюда, по Клаузиусу, можно вывести еще другое заключение, ставшее одинаково важным как для физики, так и для химии, *что и в химически простых телах, как и в сложных, всегда несколько атомов соединено в одну молекулу.*

*Возникшая таким образом кинетическая теория газов явилась совершенно революционным актом, достаточные основания которого зиждились, конечно, в механической теории теплоты. Она вырвала, по крайней мере, одну часть вещества из-под действия старых элементарных сил и свела все изменения и процессы в газах к изменчивым, но вечным самим по себе движениям. Несмотря на это, новая теория вызвала относительно мало принципиальных возражений, а напротив, встретила почти повсюду благосклонный прием и усердную дальнейшую разработку. Причина этого поразительного явления заключалась, конечно, в том, что новая теория возникла под защитой другой, уже признанной теории, которая все более укреплялась, а главным образом в том, что основоположники ее совершенно не касались *принципиальной* области, что они оставляли совершенно незатронутыми привычные примитивные силы и освободили от их действия одни лишь газовые молекулы; что они не обобщили дальше своей теории, не распространили ее на всю область физики, а пока ограничились одной только областью термотики, которая находилась в стадии преобразования. И, наконец, — а с физической точки зрения это было наиболее убедительным доводом, — в пользу новой теории газов говорили быстрые успехи, которых она достигла при разрешении своих ближайших задач, а именно, при определении скорости молекул, их средней длины пробега и т. д., равно как и согласие ее выводов с данными экспериментальных измерений¹.*

¹ Что при этом все же отдельные и даже известные физики оставались еще противниками кинетической теории газов, является, конечно, вполне естественным при новизне ее принципиальных основ. Так, например, в недавно вышедшей довольно обстоятельной статье „La notion de force dans la science moderne" („Revue scientifique" (3), XXXVI, стр. 129, 1885) ревностный и плодо-

210 ВЫЧИСЛЕНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ МОЛЕКУЛ

Мы видели, что Джоуль уже в 1851 г. вычислил, по крайней мере, для водорода, скорость молекул при некоторой определенной температуре. Более обще подошел к разрешению той же задачи Клаузиус в математических дополнениях к своему сочинению 1857 г. Подобно Джоулю он тоже определил только *среднюю скорость молекул* и для этой цели допустил, что все молекулы газа движутся с одной и той же скоростью, хотя в действительности такое допущение, конечно, неверно. Сверх того он не принял в расчет и взаимного столкновения молекул, так как при допущении идеальной упругости их скорости от столкновений не изменяются; при этом молекула всегда лишь обменивается своим движением с другой молекулой. Положим, что расстояние между двумя противоположными стенками сосуда, измеренное по перпендикуляру, равно h , и пусть направление движения молекулы образует с этим перпендикуляром угол θ , тогда длина пути от одной стенки до другой будет равна $h/\cos\theta$, а число ударов молекулы о каждую стенку в секунду $=ucos\theta/2h$, где u обозначает скорость молекулы. Сделаем еще допустимое предположение, что все возможные направления движения встречаются у отдельных молекул одинаково часто, тогда число молекул, направления которых лежат в пределах углов от θ до $\theta+d\theta$, будет относиться к общему числу n всех имеющихся молекул, как площадь шарового пояса, лежащего между кругами, соответствующими углам θ и $\theta+d\theta$, относится к поверхности полушара. Число молекул, соответствующее угловому интервалу от θ до $\theta+d\theta$, будет равно $n \sin\theta d\theta$, а число произведенных ими ударов: $(\eta/2h)\cos\theta\sin\theta d\theta$.

Но согласно законам упругого удара действие стенки на молекулу состоит в том, что она отнимает у нее скорость $ucos\theta$ и потом возвращает ей ту же самую скорость, но в противоположном направлении, или же что она вновь сообщает молекуле в этом последнем направлении скорость $2ucos\theta$. Если мы обозначим массу одной молекулы через m , то сообщенное ей количество движения будет равно $2mucos\theta$, а количество движения, сообщенное всем молекулам в интервале от θ до $\theta+d\theta$ в течение одной секунды, составит $(nmu^2/h)\cos^2\theta\sin\theta d\theta$. Проинтегрировав это выражение от $\theta=0$ до $\theta=\pi/2$, мы получим количество

творный исследователь в области теории теплоты Г. Гирн полемизирует против механической теории газов. Но Клаузиус тотчас же вслед за тем опроверг его возражения („Bull. de l'Acad. Belg." (3), XI, стр. 173, 1886; „Beiblätter zu Wied. Ann.", XI, стр. 218). О главной работе Гирна „Exposition analytique et expérimentale de théorie mécanique de la chaleur" (Paris et Colmar 1862), которая представляет большую ценность, в особенности благодаря своим экспериментальным основам, очень характерно отозвался Иохман („Die Fortschritte der Physik im Jahre 1862", стр. 299): „Далее, ясное понимание принципов в высокой степени затруднено тем обстоятельством, что автор планомерно избегает какого бы то ни было гипотетического взгляда на сущность теплоты".

ВЫЧИСЛЕНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ МОЛЕКУЛ 211

движения, сообщенное стенкой всему газу: $ntu^2/3h$. Так как количество движения, сообщенное в единицу времени, представляет меру силы, то предыдущее выражение дает в то же время действие стенки на газ, или — так как действие и противодействие между собой равны — также давление газа на стенку. Следовательно, если обозначить площадь стенки через a , а объем сосуда, имеющего форму прямоугольного параллелепипеда, через v , то давление газа на единицу площади стенки выразится через $p=ntu^2/3ah$ или $p=ntu^2/v$. Для того чтобы обратно из этой формулы определить молекулярную скорость, положим вес газа равным q и примем во внимание, что $q/g=nm$; тогда мы получим для u выражение $u^2=3gpv/q$. В это выражение будет еще удобнее ввести плотность и температуру газа. Если в качестве единиц меры принять килограмм и метр, то для одного килограмма любого газа, находящегося под атмосферным давлением, будет $p=10\ 333$, $q=1$ и $v=0,7733T/273\alpha$, если абсолютную температуру точки замерзания воды взять равную 273° , объем одного килограмма воздуха при атмосферном давлении и при температуре замерзания положить равным $0,7733\text{ см}^3$ и если через d обозначить плотность газа при 0° С , а через T — абсолютную его температуру. Введя затем вместо g его значение $9,80886$, получим для скорости молекулы газа при абсолютной температуре T выражение $u=485T/273d$, откуда для скоростей молекул кислорода, азота и водорода при температуре замерзания воды получаются соответственно следующие числа: 461 м , 492 м и 1844 м^1 .

Этот вывод скоростей частиц газа заключал в себе дальнейшую задачу. Действительно, вычисленная выше скорость газовых частиц представляет собою среднюю скорость, определенную в том предположении, что давление в сосуде одинаково по всем направлениям. Но выше было уже отмечено, что в действительности едва ли можно допустить, чтобы это условие было когда-нибудь выполнено; следовательно, возникает вопрос, насколько скорости отдельных молекул могут отклоняться от этих средних скоростей. Этот вопрос поставил и впервые разрешил Клерк Максвелл, который вслед за Клаузиусом усиленно занялся механической теорией теплоты и особенно успешно разработал ее с математической стороны. В своей работе 1860 года ² он

¹ „Pogg. Ann.“, С, стр. 370. Найденное Джоулем для водорода число 6055 английских фут.=1844,7 м почти в точности совпадает с числом, полученным Клаузиусом.

² „Illustrations of the dynamical theory of gases“, Part. I: On the motions and collisions of perfectly elastic spheres, „Philosophical Magazine“ (4), XIX, стр. 19, 1860; James Clerk Maxwell родился в 1831 г. близ Эдинбурга; проходил курс наук в Эдинбурге и Кембридже, в 1856 г. был профессором физики в Маришальском

212 ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАКСВЕЛЛА

вывел названный по его имени закон, гласящий, что распределение молекул по их скоростям выражается при помощи той же самой математической формулы, что и распределение эмпирических наблюдений по величине их ошибок, формула которых дается в теории ошибок наблюдения. Поэтому, разумеется, и в каждом газе при совершенно равномерной температуре возможны самые разнообразные скорости; но чрезвычайно большие и чрезвычайно малые скорости имеют очень незначительную вероятность, большая же часть молекул движется со средними скоростями. Средняя арифметическая скорость, исчисленная по этому закону распределения молекулярных скоростей, несколько меньше, чем определенная Джоулем и Клаузиусом, а именно, $G = \sqrt{(8/3\pi)}$ ¹, если G обозначает первую скорость, а V вторую. Данное Максвеллом обоснование закона распределения молекулярных скоростей было признано не вполне безупречным², так как оно опиралось на одно положение, которое само по себе еще требовало доказательства, но самый закон сохранил полную силу. В 1868 г.³ Максвелл дал другое доказательство, исходя из другого положения; это доказательство было позднее еще дополнено Больцманом⁴.

При вычислении давления газов и скорости движения их частиц Клаузиус мог совершенно пренебречь взаимными столкновениями последних, так как он предполагал молекулы газов абсолютно упругими. Однако для понимания молекулярного состояния газов и для опровержения возражений, выдвинутых по недоразумению против кинетической теории газов, эти столкновения составляли как раз весьма важный элемент, вследствие чего Клаузиус уже в следующем году после упомянутой выше работы обратился к определению средней длины свободного пути молекул⁵. Здесь он опять-таки исходил из упрощенных условий. Он допустил, что в пространстве, заполненном неподвижными молекулами неравномерно, но повсюду одинаково плотно, движется всего только одна молекула. Для вероятной средней длины пути, который частица пробежит до столкновения ее с другой частицей, Клаузиус нашел величину $L = \lambda^3 / \pi s^2$, где λ обозначает среднее расстояние между

колледже в Абердине, в 1860 г. в Королевском колледже в Лондоне; с 1865 г. жил в качестве частного лица, пока в 1871 г. не был приглашен профессором физики в Кембридж, где и умер 5 ноября 1879 г.

¹ О. Е. Meyer, Kinetische Theorie der Gase, стр. 43, Breslau 1877.

² Там же, стр. 36.

³ „Philosophical Magazine“ (4), XXXV, стр. 129 и 185.

⁴ „Studien über das Gleichgewicht der lebendigen Kraft zwischen bewegten materiellen Punkten“, „Wiener Sitzungsber.“, LVIII, 2 отд., стр. 517, 1868. „Über das Gleichgewicht zwischen mehratomigen Gasmoleculen“, „Wiener Sitzungsber.“, LXIII, 2 отд., стр. 397 и 679, 1871; „Wiener Sitzungsber.“, LXVI, стр. 213 и 274, 1872 и т. д. По поводу этого доказательства позднее между О. Мейером и Л. Больцманом завязалась полемика, с которой можно ознакомиться в „Wiener Sitzungsber.“, LXXVI, 2 отд., стр. 373, 1877 и в „Wied. Ann.“, VII, стр. 317; VIII стр. 653; X, стр. 296.

⁵ „Mittlere Länge der Wege, welche bei der Molecularbewegung gasförmiger Körper von den Moleculen zurückgelegt werden“, „Pogg. Ann.“, CV, стр. 239, 1858.

СРЕДНЯЯ ДЛИНА СВОБОДНОГО ПУТИ МОЛЕКУЛЫ 213

двумя соседними молекулами, а s — радиус сферы их действия ¹. Однако эта средняя длина пути становится меньше в том случае, когда не одна только частица, а все молекулы движутся равномерно. Допустив снова, что все частицы движутся с одинаковыми скоростями по всем направлениям, Клаузиус нашел, что вероятная средняя длина пути для этого случая движения всех частиц равна $\frac{3}{4}$ вычисленной выше ², т. е. $L=3\lambda^3/4\pi s^2$. Но если допустить, что скорость движения различных молекул неодинакова, то, очевидно, для вероятной средней длины пути должна получиться другая величина. На основании изложенного выше закона распределения скоростей Максвелл ³, а затем иным путем О. Е. Мейер ⁴ вывели для вероятной средней длины пути формулу $L=(1/\sqrt{2})(\lambda^3/\pi s^2)$ ⁵. Во всяком случае, из обеих этих формул вытекала правильность следующей пропорции: «средняя длина пути одной молекулы так относится к радиусу сферы ее действия, как все занятое газом пространство относится к той части последнего, которое заполнено сферами действия всех молекул» ⁶. Последнего положения было достаточно для Клаузиуса, чтобы устранить большую часть возражений, выдвинутых против механической теории газов. А именно, очень многие выдающиеся физики сделали из механической теории газов тот вывод, что и в состоянии покоя каждый газ должен был бы проявлять

¹ Под *сферой действия* молекулы Клаузиус подразумевает описанную около центра тяжести молекулы сферу, до поверхности которой может дойти центр тяжести какой-нибудь другой молекулы до того момента, когда последняя отскочит („Pogg. Ann.", доп. том VII, стр. 243). Если представить себе молекулы в виде твердых шаров, которые могут приблизиться друг к другу только до соприкосновения своими поверхностями, то диаметр такой молекулы должен оказаться равным радиусу сферы действия у Клаузиуса.

² Доказательства последней формулы Клаузиус здесь еще не приводит, так как постоянный множитель $\frac{3}{4}$, по его мнению, здесь еще не имеет значения, но указывает, что это доказательство несложно.

³ „Philosophical Magazine" (4), XIX, стр. 19, 1860.

⁴ „Kineticische Theorie der Gase", стр. 118 и 294, Breslau 1877, а также „De gasorum theoria", Breslau 1866. О. Е. Meyer (родился в 1834 г.) — профессор физики в Бреславле.

⁵ Позднее („Wied. Ann.", X, стр. 92, 1880) Клаузиус о принятом им допущении равных молекулярных скоростей и полученном им при этом допущении множителя $\frac{3}{4}$ говорит следующее: „Так как этот случай был взят мною только для облегчения выводов, то я охотно признаю, что выведенная из максвелловского закона величина $\sqrt{1/2}$ — скорее отвечает действительности" (стр. 95).

По поводу других дальнейших возражений (Korteweg, „Arch. Néerlandaises des sciences", XII, стр. 241, 1877) он указывает, что эти формулы все-таки никак не могут быть точными, пока нельзя дать точного определения понятия сферы действия. „Пока у нас нет более точных данных о молекулах,— заканчивает он,— мне представляется наиболее целесообразным при определении средней длины пути довольствоваться некоторым приближением... Эта неточность попадает тогда в ту же категорию, что и отклонение газов от законов Мариотта и Гэ-Люссака и от других законов, имеющих силу для идеальных газов" (стр. 102). ⁶ „Pogg. Ann.", CV, стр. 250.

214 ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ ГАЗОВ

необычайно быстрое движение и что, например, газовая частица должна была бы в течение одной секунды пробегать сотни раз пространство комнаты; однако последнее совершенно не согласуется с медленностью *диффузии* и незначительной *теплопроводностью* газов, равно как и с величиной *скорости звука в воздухе*. С помощью же найденного соотношения Клаузиус смог доказать, что хотя согласно новой теории газов скорость молекул и очень велика, но действительное движение их в силу взаимных столкновений ограничивается очень малым пространством, поэтому передача молекулярных движений внутри газов может быть всегда только сравнительно медленной¹. Для действительного *исчисления* длины свободного пути предыдущие формулы были, разумеется, недостаточны, так как они содержали в себе две невыясненные еще величины λ и s , — среднее расстояние между молекулами и радиус сферы действия. Численное определение абсолютной величины длины пути впервые произвел опять-таки Максвелл в упомянутой уже работе 1860 г. с помощью *коэффициента внутреннего трения газов*.

На *внутренние сопротивления при движении капельных жидкостей* уже давно обратили внимание, и еще Ньютон объяснял их известную вязкостью жидкостей; тем не менее, эти сопротивления долгое время не были более близко исследованы. Кулон² около 1803 г. придумал для определения таких сопротивлений особый прибор, состоявший из кружка, подвешенного горизонтально на нити, которая была прикреплена в его центре; кружок совершал в жидкости горизонтальные колебания около своего центра. Гаген³ и Пуазель⁴ около 1840 г. одинаково установили, что подобное сопротивление оказывается и при течении жидкостей по узким трубкам. Если у жидкостей эти сопротивления объяснялись, по-видимому, без особых затруднений некоторым сцеплением между движущимися друг около друга частицами жидкости, то для газов, у которых согласно прежним представлениям возможны только отталкивательные силы, подобные объяснения были совершенно невозможны; а между тем и здесь были открыты сопротивления внутрен-

¹ Бейс-Баллот („Pogg. Ann.", CIII, стр. 240, 1858) в защиту своей теории агрегатного состояния тел и в качестве возражения против механической теории газов указал на *медленное распространение дыма*, медленную *диффузию газов* и на существование *резкой границы атмосферы*. В частности, об отношении своей теории к теории Клаузиуса он говорит следующее („Pogg. Ann.", CIII, стр. 250). „Ясно, что и я при испарении допустил для первого мгновения прямолинейное движение, но только для одного мгновения; конечно, трудно допустить существование упорядоченной вибрации у газовых частиц, но все же я не могу согласиться с предположением постоянного прямолинейного движения. Если бы я захотел приблизиться к Клаузиусу, то я мог бы это сделать, присвоив газам тот род движения, который он допускает для жидкостей и согласно которому многие частицы должны двигаться навстречу другим частицам с постоянно изменяющеюся скоростью. Но одно прямолинейное движение представляется мне все же неприемлемым". Подобно Баллоту высказался против механической теории газов и Гоппе („Pogg. Ann.", CIV, стр. 279), а несколько позднее и Иохман („Pogg. Ann.", CVIII, стр. 153). Последний полагал, что скорость звука, равно как и законы движения газов, не может быть выведена из этой теории.

² „Exp. destinées à déterminer la cohérence des fluides et les lois de leur résistance dans les mouvements très-lents", Mém. de l'Inst., III, An. IX.

³ „Pogg. Ann.", XLVI, стр. 423, 1839.

⁴ „Comptes rendus", XI, стр. 961, 1046; XII, стр. 112 и другие места.

ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ ГАЗОВ 215

ним движениям, которые, подобно упомянутым выше сопротивлениям в жидкостях, по-видимому, проистекали от внутреннего трения. Около 1829 г. Сэбин¹ показал, что замедления колебания маятника совершались не одинаково, в зависимости от того, происходили ли эти колебания в сосуде, наполненном при одном и том же давлении воздухом или водородом; эти замедления были непропорциональны плотности: в водороде они были сравнительно больше, чем в воздухе. Поэтому при вычислении колебаний маятника стали всегда вводить поправку на это замедление. Стокс² в 1851 г. доказал, что множитель, применяемый для таких поправок, соответствует внутреннему трению газов, и, введя этот множитель в уравнения движения, он получил вполне согласные результаты. Несколько раньше этого Грэхем³ наблюдал при истечении газов через капиллярные трубки сильные изменения скоростей, подобные изменениям, наблюдаемым в жидкостях Пуазелем и Гагеном; на основании этих явлений тоже можно было с уверенностью сделать заключение о наличии внутреннего трения в газах.

Все исследования над внутренним трением показали, что последнее происходит путем; передачи движения от движущихся частиц жидкости частицам, находящимся в покое, или же путем передачи движения от частиц, движущихся быстрее, частицам, движущимся медленнее. Но в то время как старая теория газов не могла дать удовлетворительного объяснения для такой передачи, последнее само собою вытекало из новой теории. Когда две струи газа движутся параллельно одна возле другой с различными скоростями, то вследствие хаотического беспорядочного движения молекул последние переходят из одной струи в другую. Так как молекулы при этом сохраняют свою начальную скорость, то молекулы более быстрой струи ускоряют движение более медленной и обратно, — более быстрая струя замедляется в своем движении. Это замедление зависит от относительной скорости одного слоя газа по отношению к другому, и оно прямо пропорционально этой скорости. Сверх того на трение влияет еще и природа самой трущейся жидкости — оно, во всяком случае, тем больше, чем больше длина свободного пути молекул. Следовательно, трение газов F можно представить в виде произведения $F = \eta \cdot c$ относительной скорости c и некоторого множителя η , который выражает зависимость трения от природы жидкостей. Этот множитель называется *коэффициентом внутреннего трения*, и, как было уже указано, он должен зависеть от средней длины

пути молекул⁴. Максвелл вывел для него формулу $\eta = \frac{1}{3} dLu$, где

¹ „Phil. Trans.“, стр. 207, 1829.

² „On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums“, „Cambridge Soc. Trans.“, IX, ч. I, 1851; также в „Philosophical Magazine“ (4), I, стр. 337. Дюбюа-Нансе, по-видимому, пользовался понятием о внутреннем трении жидкостей уже в 1786 г. в своих „Principes d'hydraulique“; точно так же и Вентури в своих „Recherches s. 1. communication latérale du mouvement dans les fluides“, Paris 1797.

³ „On the motion of gases, their effusion and transpiration“, „Phil. Trans.“, стр. 573, 1846 и стр. 349, 1849.

⁴ На пропорциональность между скоростью и внутренним трением указал уже Ньютон („Principia mathematical kn. II, отд. IX, 2-е издание, стр. 345):

216 КОЭФФИЦИЕНТ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ

d — плотность рассматриваемого газа, а L и u обозначают, как и прежде, среднюю длину пути и среднюю скорость молекул газа. Так как u было уже известно, а d могло быть легко измерено, то фактически оставалось только определить из опыта η , чтобы иметь возможность с помощью предыдущей формулы вычислить среднюю длину пути L ¹.

Такое опытное определение произвел в 1866 г. Максвелл² почти одновременно с О. Е. Мейером³ по найденному Кулоном методу. Максвелл, подобно Кулону, подвешивал в горизонтальном положении кружок на проволоке, прикрепленной в его центре; кручением проволоки этот кружок приводился в колебательное движение, которое совершалось около его центра в его собственной плоскости. Постепенное затухание возбужденных колебаний зависит при этом почти только от внутреннего трения того рода газа, в котором кружок колеблется, так как вследствие прилипания на кружке всегда остается тонкий слой газа, который, двигаясь вместе с кружком, трется о газ, находящийся в покое. Влияние возможного еще сверх того внешнего трения между кружком и газовым слоем может быть исключено в результате опытов с кружками различной величины. Эти опыты привели к поразительному результату, *что внутреннее трение не зависит от давления или плотности*. Последнее, разумеется, возможно только при том условии, что плотность d с возрастанием давления увеличивается как раз настолько, насколько при этом уменьшается длина свободного пути. Легко показать, что это именно так и должно быть; для этого следует в формулу для η подставить ранее полученную для L величину

$L=3\lambda^3/4\pi s^2$; тогда $\eta=^{1/4}d\lambda^3u/\pi s^2$, или же, если заменить d через mN ,

„Соппротивление, возникающее вследствие недостаточной скользкости частей жидкости, при прочих равных условиях, пропорционально скорости, с какой части жидкости удаляются друг от друга“. Строго говоря, об относительной скорости двух соседних слоев может быть речь только при внешнем трении различных веществ. Внутри однородной жидкости разности скоростей соседних слоев бесконечно малы и трение здесь может быть только определено как частное от деления этой бесконечно малой разности на бесконечно малое расстояние между пограничными слоями. Если нормаль к поверхности, на которой имеет место трение, обозначить через x , то внутреннее трение (отнесенное к единице поверхности) будет равно $F=\eta dc/dx$. Коэффициент η внутреннего трения есть, следовательно, то трение, которое имеет место на единице поверхности, когда в нормальном направлении к поверхности скорость на протяжении единицы длины изменяется на единицу скорости (ср. О. Е. Meyer, „Pogg. Ann.“, CXIII, стр. 67 и „Kinetische Theorie der Gase“, стр. 316).

¹ Так как, подобно трению, и *диффузия газов* должна зависеть от средней длины пути молекул, то приверженцы новой теории были вынуждены вывести и закон последней непосредственно из новых гипотез. Этим занялся Максвелл во второй части своей работы 1860 г. („Illustrations of the dynamical theory of gases“; part. II: On the process of division of two or more kinds of moving particles among on another, „Philosophical Magazine“ (4), XX, стр. 21); теорию диффузии на основе своей более поздней гипотезы о природе молекул газа он дал в 1868 г. („Philosophical Magazine“ (4), XXXV, стр. 199).

² „Phil. Trans.“ стр. 249, 1866.

³ „Pogg. Ann.“, CXXV, стр. 177, 401 и 564, 1866.

КОЭФФИЦИЕНТ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ 217

где m — молекулярный вес, а N — число молекул в единице объема, получается $\eta = \frac{1}{4} m N \lambda^3 u / \pi s^2$, или же, так как, очевидно, $N/\lambda^3 = 1$,

$\eta = \frac{1}{4} m u / \pi s^2$ Последнее выражение уже не содержит плотности. Для того чтобы еще больше подкрепить этот результат, а вместе с тем и правильность формулы для коэффициента, О. Е. Мейер¹ в своей второй работе вычислил коэффициенты внутреннего трения из упомянутого уже ряда опытов, которые в 1846 и 1849 гг. Грэхем произвел над *вытеканием газов через капиллярные трубки*. Результаты этих расчетов тоже оказались в достаточном согласии с данными последнего исследования.

Но вычислив с помощью коэффициента внутреннего трения из формулы $\eta = \frac{1}{3} d L u$ среднюю длину свободного пути молекулы, можно тотчас же, путем деления скорости молекулы на длину свободного пути, определить и *число столкновений одной молекулы с другими* в течение одной секунды. Эти константы кинетической теории газов О. Е. Мейер собрал в 1877 г. в одной таблице, которую мы частично здесь и приводим².

Един.: см и сек. Темп.: 20° С Давление: 760 мм рт. ст.	Коэф- циент трения	Длина пути	Число столкно- вений в млн.	Молеку- лярный вес
Водород	0,000093	0,00001855	9480	2
Светильный газ	0,000120	0,00000848	7330	15,97
Аммиак	0,000108	0,00000737	8130	17,01
Окись углерода	0,000184	0,00000985	4780	27,93
Этилен	0,000109	0,00000582	8060	27,94
Азот	0,000184	0,00000986	4760	28,02
Окись азота	0,000186	0,00000959	4735	29,97
Кислород	0,000212	0,00001059	4065	31,92
Сероводород	0,000130	0,00000628	6750	33,98
Хлороводород	0,000156	0,00000734	5650	36,37
Угольная кислота	0,000160	0,00000680	5510	43,89

Приведенные результаты показали, что на основе новейшей теории теплоты, по крайней мере, газообразное состояние материи могло быть объяснено чисто кинетически, без всякого участия элементарных молекулярных сил. Отталкивательная сила была заменена живою силою движения, а притягательная — взаимными столкновениями частиц, которые, совершенно так же, как прежде притяжение, поддерживали моле-

¹ „Pogg. Ann.", CXXVII, стр. 253 и 353, 1866.

² „Kinetische Theorie der Gase", стр. 142.

218 НОВАЯ ГИПОТЕЗА МАКСВЕЛЛА О ДЕЙСТВИИ МОЛЕКУЛЯРНЫХ СИЛ

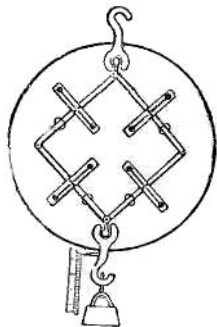
кулы в их колебаниях около некоторого среднего положения. Разумеется, все это имеет силу только для идеальных газов, для реальных же газов приходилось пока сохранить действие элементарных притягательных сил. Однако и по отношению к идеальным газам теория не была еще свободна от всех трудностей, и как раз один из ее наиболее ревностных защитников, Максвелл, в конце концов, стал склоняться к мысли, что и здесь нельзя обойтись без отталкивательной силы частиц. Согласно его формуле $\eta = \frac{1}{3}dLu$, внутреннее трение прямо пропорционально молекулярной скорости u , а вместе с тем и квадратному корню из живой силы молекул, или также квадратному корню из абсолютной температуры газа, — в том, однако, предположении, что длина пути не зависит от температуры, так как в противном случае внутреннее трение могло бы возрастать в большем отношении, чем квадратный корень из температуры. Максвелл, действительно, считал необходимым допустить независимость средней длины пути от температуры; но так как последующие измерения внутреннего трения газов указывали как будто на возрастание последнего просто пропорционально температуре, то Максвелл пришел к убеждению, что отстаивавшаяся им до сих пор теория газов не может быть сохранена в прежнем своем виде. В своей работе 1866 г.¹ Максвелл отказался от идеи полной свободы движений газовых молекул и вместе с тем совершенно отказался от своих прежних теоретических основ. После этого он построил свой математический вывод движений молекул газа на гипотезе, что между молекулами газа действует сила отталкивания, величина которой обратно пропорциональна пятой степени расстояния. В этом Максвелл разошелся с другими исследователями в данной области, не добившись в то же время полного признания со стороны остальных физиков. О. Е. Мейер в своей «Кинетической теории газов»² говорит об указанном допущении Максвелла: «Я, пожалуй, присоединился бы к такому воззрению, которое мгновенно действующие силы удара прежней теории заменило бы постоянно действующими силами, заметными только на очень малом расстоянии; но я не могу присоединиться к новой точке зрения Максвелла и не вижу к тому никаких оснований. Во-первых, выведенный им из собственных наблюдений закон совершенно неверен для исследованных им постоянных газов; согласно данным Обермайера и Пулуя он верен приблизительно только для некоторых способных к сгущению газов. Во-вторых, — и это является наиболее важным соображением, — новая теория Максвелла, принимающая для отталкивательных сил закон уменьшения в обратном отношении пятой степени расстояний, заключает в себе внутреннее противоречие, так как согласно этой гипотезе величина действующей силы не становится ничтожно малой, когда расстояние достигает некоторой конечной величины. Таким образом, молекулы, находясь постоянно под влиянием действующих на расстоянии сил, не могут в промежутке между двумя

¹ „Philosophical Magazine" (4), XXXII, стр. 390, 1866; там же, XXXV, стр. 129 и 185, 1868.

² „Kinetische Theorie der Gase", стр. 161, Breslau 1877.

НОВАЯ ГИПОТЕЗА МАКСВЕЛЛА О ДЕЙСТВИИ МОЛЕКУЛЯРНЫХ СИЛ 219

столкновениями двигаться ни по инерции, ни прямолинейно; но тогда неверен и... закон распределения скоростей Максвелла. Одним словом, тогда рушится вся эта теория. В-третьих, новая гипотеза Максвелла противоречит не только данной теории, но и опыту. Джоуль и Томсон экспериментальным путем доказали, что между частицами газа действуют притягательные силы, а не отталкивательные. Поэтому всякую теорию, исходящую из гипотезы о молекулярном отталкивании, следует сразу же отвергнуть». Действительно, Джоуль и Томсон в общих своих работах, проведенных в 1853 и 1854 гг.¹, пришли к тому выводу, что хотя между молекулами газа и проявляется некоторая сила, действующая на расстоянии, но что эта *сила сцепления* имеет почти исчезающе малую величину. У. Томсон² в ряде своих работ до новейшего времени пытался свести отталкивательные и упругие силы не только в газах, но также и в жидкостях и твердых телах к живым силам движений, что же касается сил притяжения, то Томсону не удалось решить, следует ли рассматривать эти силы как элементарные или тоже как производные. Вопреки новому взгляду Максвелла приверженцы новейшей теории газов большею частью остались на той точке зрения, что, по крайней мере, отталкивательные силы газов следует выводить только из движения молекул. Хотя Больцман вначале примкнул, было к Максвеллу и воспользовался его законом взаимодействия в своих исследованиях о тепловом равновесии газовых частиц³, однако в одной из позднейших работ⁴ он указывает, что с наблюдаемыми фактами можно было бы согласовать *целый ряд* различных допущений об основных молекулярных силах, что хотя допущение упругих атомов равносильно допущению отталкивающих сил, но что на основе допущения между молекулами одних только притягательных сил можно было бы так же хорошо объяснить известные явления, как и допустив одни только отталкивательные силы; в конце концов, он



Черт. 7.

¹ „On the Thermal Effects of Fluids in Motion“, „Phil. Trans.“, стр. 357, 1853 и стр. 321, 1854.

² „S. Steps towards a kinetic theory of matter“, „Nature“, XXX, стр. 417, 1884. В этой статье Томсон описывает, между прочим, модель пружинных весов, в которых упругая сила пружины заменена инерцией вращающихся маховых колес (см. приложенный чертёж 7 из „Nature“ XXX, стр. 419).

³ „Wiener Sitzungsber.“, LXVI, стр. 213: „Über das Wirkungsgesetz der Molecularkräfte“, см. также LXVI, стр. 273 и т. д.

⁴ „Wied. Ann.“, XXIV, стр. 37. 1885: „Über die Möglichkeit der Begründung der kinetischen Gastheorie auf anziehende Kräfte allein“. Больцман говорит там (стр. 38): „Этот закон взаимодействия (закон Максвелла), вероятно, столь же мало отвечает действительному закону природы, как и закон взаимодействия упругих шаров... Мне казалось, однако, бесполезным разработать представление о газообразном состоянии вещества на основе еще других и по возможности разнообразных допущений, чтобы тогда иметь возможность решить, какое представление больше всего подходит к реальным молекулам, которые, несомненно, представляют собою очень сложные индивиды“.

220 ВЫЧИСЛЕНИЕ ЧИСЛА И РАЗМЕРОВ МОЛЕКУЛ ЛОШМИДТОМ

приходит к заключению, что первое допущение, пожалуй, даже имеет преимущество перед последним.

После определения скорости и длины свободного пути газовых частиц кинетической теории газов оставалось еще определить *величину* молекул и *их число* в каком-нибудь заданном объеме. Первую попытку определения величины молекулы сделал Лошмидт¹ в 1865 г. Если величину $(D^2/4)L\pi$ (где D и L по-прежнему обозначают диаметр и длину свободного пути молекулы) назвать *молекулярным объемом пути*, а частное от деления объема, занимаемого газом, на число заключающихся в нем молекул — *молекулярным объемом газа*, то легко показать, что первый объем может составлять только $3/16$ второго. А именно, согласно формуле Клаузиуса $L = \sqrt{3/4} \cdot \lambda^3 / \pi D^2$ ², следовательно, весь объем пути всех N молекул газа, содержащихся в единице объема, выразится через

$$\frac{D^2}{4} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{\lambda^3}{\pi D^2} \cdot \pi \cdot N$$

; отношение же всего объема пути ко всему объему газа в единице объема будет равно $3/16 N \lambda^3 : 1$ или, так как аналогично предыдущему $N \lambda^3 = 1$ ³, рассматриваемое отношение будет равно $3/16 : 1$. Действительный объем $D^3 \pi / 6$ одной газовой молекулы, конечно, меньше ее молекулярного объема. Допустив, что ν есть то число, на которое надо умножить последний объем, чтобы определить первый, мы получим возможность выразить молекулярный объем газа двояким способом, а из полученного таким образом уравнения

$$\nu \cdot \frac{16}{3} \cdot \frac{D^2}{4} \cdot L \cdot \pi = \frac{D^3}{6} \cdot \pi$$

следует, что $D = 8\nu L$. Число ν Лошмидт назвал *множителем сгущения* рассматриваемого газа. Если допустить, что в жидком состоянии молекулы непосредственно соприкасаются друг с другом, то множитель сгущения может быть определен из отношения плотностей вещества в газообразном и жидком состояниях, и тогда отсюда может быть вычислено D . Конечно, при этом возможно, что и в жидком состоянии молекулы все еще находятся друг от друга на некотором расстоянии и что поэтому полученные для диаметров величины дают только предельное значение, а именно, их верхний предел. Лошмидт располагал в то время только данными о средней длине пути частиц атмосферного воздуха, но для последнего, так как воздух не мог быть сгущен, нельзя было вычислить коэффициента сгущения. Однако Лошмидту удалось

¹ „Zur Grösse der Luftmolecüle“, „Wiener Sitzungsberichte“, LII, 2 отдел, стр. 395, 1866. J. Loschmidt (родился в 1821 г.) — профессор физики Венского университета.

² См. стр. 213.

³ См. стр. 217.

ВЫЧИСЛЕНИЕ ЧИСЛА И РАЗМЕРОВ МОЛЕКУЛ ЛОШМИДТОМ 221

косвенным путем определить его величину в 1/1555, и тогда для диаметра молекулы воздуха он получил величину 0,00000118 мм. Позднее, когда уже были определены средние величины свободного пути молекул для большого числа веществ, можно было вычислить и размеры их молекул; О. Е. Мейер в своей «Кинетической теории газов» дал следующие вычисленные по методу Лошмидта числа ¹.

	Плотность		Множи- тель сгущения ν	Диаметр молекулы D в миллион- ных долях миллиметра
	в газо- образном состоянии	в жид- ком со- стоянии		
Вода	0,6235	1	0,00081	0,44
Аммиак	0,5967	0,6502	0,00119	0,45
Сероводород	1,1912	0,9	0,00168	0,89
Угольная кислота	1,5291	0,9985	0,00198	1,14
Закись азота	1,5204	0,9646	0,00204	1,18
Циан	1,8064	0,866	0,00270	0,96
Сернистая кислота	2,247	1,49	0,00195	0,80
Хлор	2,450	1,33	0,00238	0,96 ²

Приведенные здесь значения диаметров частиц следует, как уже было указано, рассматривать как верхние пределы этих величин. Действительную величину этих диаметров впервые попытался определить ван-дер-Ваальс ³, исходивший при этом из положения, что *отклонения газов от закона Мариотта* зависят, главным образом, от величины их молекул, и постаравшийся, обратно, вычислить эти величины из указанных отклонений. Другой путь для осуществления той же цели избрал Дорн ⁴, который постарался вывести размеры молекул из диэлектрических постоянных рассматриваемых веществ. Данные им числа, приведенные ниже, хорошо согласуются с числами, полученными

¹ „Kinetische Theorie der Gase“, стр. 226, Breslau 1877. Было бы как будто осторожнее брать здесь вместо диаметра молекулы радиус сферы действия, по примеру Клаузиуса, т. е. брать наименьшее расстояние, на которое могут сблизиться центры тяжести молекул. Но так как абсолютным препятствием для проникновения материи в какое-либо пространство мы можем считать лишь его заполненность другой материей, то понятие о сфере действия фактически совпадает с понятием о заполненном веществе пространстве.

² О. Мейер („Kinetische Theorie der Gase“, стр. 234) сравнивает это число с данными, полученными раньше совершенно иным путем Фарадеем, Плато, Квинке, Томсоном и другими для предельных значений размеров молекул, и находит, что ни одно из этих значений не противоречит числам, приведенным в таблице, а некоторые их даже хорошо подтверждают.

³ „Over de continuïteit van den gasen vloeïstoftoestand“, Leiden 1873; извлечение в „Beibl. zu Pogg. Ann.“, I, стр. 10, 1877.

⁴ „Wiedem. Ann.“, XIII, стр. 378, 1881. — Е. Dorn (родился в 1848 г.) — профессор университета в Галле.

222 РАССТОЯНИЕ МЕЖДУ МОЛЕКУЛАМИ ГАЗА

ван-дер-Вальсом, и — как следовало ожидать — значительно меньше чисел, вычисленных Мейером.

	Формула	$D \cdot 10^7$ по Дорну в мм	$D \cdot 10^7$ по ван-дер-Вальсу
Атмосферный воздух . .		1,6	3,0
Угльная кислота . . .	CO ₂	1,8	1,8
Водород	H ₂	1,4	1,4
Закись азота	N ₂ O	1,8	
Сернистая кислота . . .	SO ₂	6,9	

Наконец, число молекул и их взаимное расстояние можно было вычислить с такой же точностью, как и их размер. О. Е. Мейер дает для числа молекул в 1 см³ величину $N=21$ триллиону, а для расстояния между двумя соседними молекулами число λ , равное 3—4 миллионным долям миллиметра; согласно закону Авогадро приведенные числа одинаковы для всех газов ¹.

Возникновение и развитие кинетической теории газов носят на себе своеобразный отпечаток. По существу, выйдя совершенно из границ господствовавшей еще ньютоновской физики, эта теория по внешности полностью сохранила облик последней; и хотя она объясняла все явления только на основе движения, однако наряду с этим она оставляла нетронутыми (в особенности вне своей области) и старые первичные силы напряжения. Таким образом, с одной стороны, весь этот переворот терял как будто свой революционный характер и этим облегчалось его всеобщее признание, но, с другой стороны, — ослаблялось то влияние, которое новое воззрение могло бы оказать на остальные отрасли физики, и совершенно оставлялось на произвол судьбы единство взгляда, как на материю, так и на силу.

Такое преобразование в узком кругу, такое созревание новшества в пределах специальной области является типичным для всей новейшей физики. Этим, несомненно, достигается та большая выгода, что всякая возможная неудача распространяется только на небольшие части науки, не потрясая целого, и что принципиальное новшество, прежде чем оно получит право предъявить притязания на всеобщее признание, проводится сначала в легко обозримой области. Однако в этом кроется, по меньшей мере, и та невыгода, что различные отрасли физики разрабатываются на разные лады, в результате чего может получиться разрыв научной связи между отдельными областями науки: приступающий к изучению науки получает в одной ее области указания на такие пути и создает себе такие представления, которые в другой области для него закрыты и совершенно воспрещены. Это новейшее направление, конечно, полезно в том отношении, что оно отнимает

¹ „Kinetische Theorie der Gase“, стр. 232, 1877.

ВВЕДЕНИЕ ПОНЯТИЯ ЭНЕРГИИ 223

почву у споров и обеспечивает мир, но, с другой стороны, — оно вредно в том отношении, что не только отрывает друг от друга научные дисциплины, но и вносит такое отчуждение в среду научных работников, что зачастую устраняется возможность взаимного понимания между отдельными группами физиков.

Конечно, эта характеристика относится не ко всем новейшим физикам. После того как был установлен закон сохранения силы, и механическая теория тепла стала развиваться на новых основаниях, некоторыми физиками были приложены очень серьезные усилия к тому, чтобы переработать весь научный кругозор соответственно новым идеям. Это преобразование имело своей конечной целью устранение всех элементарных первичных сил материи, или, вернее, сведение последних к первоначальным внутренним движениям материи. Но так как провести подобное устранение или сведение в полной строгости для всей физики в настоящее время оказалось еще невозможным, то этой цели пытались достичь окольным путем. Старались охватить все наглядные, доступные нашим чувствам движения и распределить их по управляющим ими законам, оставляя в стороне элементарные или конечные причины этих движений, все равно, будь то первичные силы или первичные движения. Это был старый чисто ньютоновский прием, и к нему прибегли раньше всех англичане, эти истинные наследники своего великого соотечественника.

Закон сохранения силы относится не к воображаемым элементарным качествам материи, которые в старом духе рассматривают как силы, определяющие материю, а лишь к количественно определенной работоспособности, которую в состоянии проявить какое-либо тело в силу своего положения и окружающих его условий. Для этой вполне определенной работоспособности Т. Юнг¹ уже в 1807 г. предложил название *энергии*, не обратившее, однако, на себя тогда внимания. Теперь представлялось как раз своевременным воспользоваться предложенным Юнгом названием, оставив двусмысленное понятие силы исключительно для обозначения элементарных свойств материи, и переименовать закон сохранения силы в *закон сохранения энергии*. Однако применение термина «энергия» потребовало некоторого обобщения самого понятия о ней; Юнг применил это слово только в *механическом* смысле и под *анергией* подразумевал работоспособность движущихся масс, которая легко измеряется произведением массы на квадрат скорости. Теперь же необходимо было истолковать это понятие также с *общефизической* точки зрения и применить его также и к телам, находящимся в покое, работоспособность которых обычно обозначали только косвенно, как действие притяжения масс, электрических сил и т. д. Это было сделано Ранкином еще в 1853 г. в совершенно общем виде и с ясным сознанием вытекающих отсюда важных последствий. В своей работе «On the general law of the transformation of energy» («Об общем законе преобразования энергии») ² он, дал следующие вполне исчерпывающие определения. *Энергия — это всякое свой-*

¹ „Lectures on natural philosophy“, I, стр. 79, London 1808.

² „Philosophical Magazine“ (4), V, стр. 106, 1853.

224 ИСКЛЮЧЕНИЕ ПОНЯТИЯ СИЛЫ

ство вещества, которое представляет собой силу или сравнимо с силой, способной производить изменения, сопровождающиеся преодолением сопротивлений. Действующая энергия есть измеримое и передаваемое или превратимое свойство, присутствие которого в веществе вызывает в нем стремление изменить свое состояние в одном или нескольких отношениях. При наступлении этих изменений действующая энергия исчезает и заменяется потенциальной энергией¹, которая измеряется величиной изменения в состоянии вещества, в связи с величиной того стремления или силы, благодаря которой это изменение произошло. После этого Ранкин выразил закон сохранения энергии в следующей форме: сумма всей энергии (потенциальной и кинетической) во вселенной остается неизменной. Два года спустя Ранкин² определенно указал, что цель этих новых определений заключалась в том, чтобы взамен лишь гипотетических атомов и их сил дать новые отвлеченные понятия, которые не содержали бы в себе ничего гипотетического и были бы выведены непосредственно из фактов.

Эти новые понятия вскоре нашли всеобщее признание. Готовность, с которой они были приняты и применены на деле, ясно указывает, что тогда действительно уже не знали, что делать со старыми понятиями об элементарных силах, и сочли полезным их совершенно отбросить. В Англии У. Томсон, который, впрочем, и раньше применял понятие энергии, с этих пор в своих работах стал употреблять исключительно терминологию Ранкина; за ним вскоре в этом отношении последовал Клерк Максвелл. В Германии Гельмгольц³ в своих отзывах о статьях Ранкина рекомендовал его определения как «удачно выбранные», хотя и не считал возможным разделить его основных философских воззрений⁴. Клаузиус также прямо перешел к применению новых идей, после чего последние пробили себе путь и в Германии, хотя, правда, медленнее, чем в Англии⁵. В 1870 г. известный английский физик Бальфур Стюарт в кратком учебнике⁶ (которому он предпослал главу о механической силе) представил все явления природы как действия одного и того же начала — энергии, — проявляющегося в различных формах. В 1873 г. выдающийся английский математик Клиффорд попытался даже совершенно покончить со старым призраком силы в пользу нового понятия об энергии⁷. Все, что мы знаем о силе и движении, — говорит Клиф-

¹ Ранкин сам указывает, что понятие *потенциальной энергии* применял уже Сади Карно, правда, — только в области механики, под термином *force vive virtuelle* (возможная живая сила) („Phil. Mag." (4), XXVIII, стр. 404).

² „The Edinburgh new philosophical Journal" (2), II, стр. 120, 1855: „Outlines of the science of energetics".

³ „Fortschritte der Physik", IX, стр. 407. Гельмгольц при этом отмечает, что понятия *энергия, действующая и потенциальная энергия* тождественны с понятиями *величины работы, живой силы и количества сил напряжения*, примененными им в его работе о сохранении силы.

⁴ „Fortschritte der Physik", XI, стр. 365.

⁵ В широко распространенном в свое время учебнике физики Эйзенлора, в издании 1863 г. слово *энергия* еще не встречается.

⁶ „Kurzes Lehrbuch der Physik" von Balfour Stewart, übers, von Rob. Schenk, Braunschweig 1872.

⁷ „Nature", XXII, стр. 122, 1873. W. K. Clifford (1845—1879) — профессор прикладной математики в Лондонском университетском колледже.

ИСКЛЮЧЕНИЕ ПОНЯТИЯ СИЛЫ 225

форд, — сводится к тому, что известная группировка окружающих тел вызывает известное изменение в движении тела. Обычно принято говорить, что такое-то расположение окружающих тел обуславливает появление известной силы. Но к чему вообще этот промежуточный член? *Почему мы сразу не переходим от окружающих тел к вызываемым ими изменениям в состоянии движения? Если мы только привыкнем переходить прямо от одного к другому без посредства втиснутого сюда понятия о силе, то последнее должно будет исчезнуть и подобно другим бесполезным понятиям постепенно перейдет в область забвения; вместе с тем исчезнет и тенденция присваивать этому призраку столь реальные и материальные свойства, как, например, неразрушимость.*

Стремления исключить понятие силы и заменить его понятием ограниченной работоспособности — энергии — представляли собой возврат от точки зрения, которой придерживались в течение 200 лет ученики Ньютона, к действительному, неискаженному воззрению их учителя, как оно было им высказано в многократно цитировавшемся, но столь же часто забывавшемся его выражении: «гипотез я не строю». Поколению физиков, настроенных критически под влиянием краха старой теории, это воззрение представлялось особенно надежным и плодотворным, и вот большая часть физики стала поразительно быстро развиваться преимущественно в этом направлении на основе закона сохранения энергии.

Математическая физика нашла в понятии об ограниченной работоспособности или энергии чрезвычайно удобную основу для своих формальных выводов и с помощью понятия потенциала, столь тесно связанного с понятием энергии, она завоевала почти всю область физики, из которой в начале нашего столетия ее рассмотрению подлежали только механика, отдельные части оптики и небольшие части учения о теплоте и акустике. Даже *экспериментальная физика*, особенно в области электричества, скоро научилась предпочитать новые понятия старым, так что и для физиков-экспериментаторов прежние элементарные силы, по сравнению с понятиями о работе и потенциале, вскоре утратили почти всю свою привлекательность.

После того как был устранен вопрос о причинах явлений, *умозрение*, или философское исследование, по-видимому, утратило в нашей науке всякую почву, — тем более что успехи двух других методических факторов отнимали у него право на какое бы то ни было признание. Но это только так казалось.

Как настойчиво ни утверждали многие физики о полной достаточности для науки нового физического понятия энергии, однако это, с другой стороны, не могло помешать возникновению вопроса о *причинах* работоспособности. Но так как причину любой кинетической энергии можно было легко найти в другой кинетической же или потенциальной энергии, то, прежде всего, возник вопрос об *источнике потенциальной энергии*. А так как во многих уже случаях мнимые потенциальные энергии, например световую и тепловую, удавалось свести к кинетическим энергиям движения атомов, то возникла надежда, что таким же образом теперь удастся объяснить и все прочие виды энергии. Скорее всего, этого можно было ожидать для электричества. Однако

226 СТАРЫЕ ГИПОТЕЗЫ О ПРИЧИНАХ ТЯГОТЕНИЯ

мы уже видели в предыдущем периоде, что постановка такой задачи была гораздо легче ее разрешения, и, действительно, до настоящего времени еще не удалось указать таких движений атомов эфира или весомой материи, из которых можно было бы вывести особенности электрических явлений и, прежде всего их полярность. Поэтому не оставалось ничего другого, как обратиться с вопросом об источнике сил к той силе, действия которой наиболее широко охватывают всю природу и кинетическое объяснение которой обещало стать наиболее плодотворным, а именно к силе тяготения. Так как тяжесть присуща всякой видимой и осязаемой материи, представляя в то же время наиболее надежную и даже единственную меру для количества всякой материи, то вопрос о тяготении находился, по-видимому, в тесной связи с вопросом о строении материи, и теория последнего представлялась связанной, прежде всего с исследованием первого. Вследствие этого старый и с давних пор запретный для ньютоновской школы вопрос о причине тяготения был в настоящее время вновь поднят, но уже не философами-материалистами, как раньше, а философствующими физиками, что, конечно, послужило ему не во вред.

Первым из этих физиков был Джон Герапат¹, который в упомянутых уже работах 1821 и 1847 гг. свел и тяготение к тепловым движениям тел. Согласно его воззрению каждое теплое тело вследствие своей теплоты проявляет по отношению к окружающей его более холодной среде такого рода отталкивательную силу, что вблизи него среда разрежается, а далее, по мере увеличения расстояния, она становится все более плотной. Вследствие этого возникает давление эфира, направленное извне по направлению к центру. Пусть два плотных тела находятся в более разреженной среде, и более теплое из них посылает теплоту более холодному. Ввиду того, что плотное тело поглощает больше тепла, чем окружающая легкая среда, на стороне второго тела, обращенной к теплому, эфир окажется разреженным, а на противоположной стороне он сгустится. Образовавшаяся таким образом разность давлений будет толкать второе тело по направлению к первому и создаст видимость как бы притяжения теплым телом более холодного. Однако невероятно, чтобы разность температуры в теле вызывала и разность давления, так как эфир при своем тепловом разрежении приобретает взамен этого большую упругость; впрочем, если даже и допустить возможность этой разности давления, было бы трудно доказать, что для нее имеют силу законы Ньютона.

В 1849 г. Ф. Бушепорн попытался объяснить все движения тел. и особенно движения небесных тел, без помощи сил, действующих на расстоянии, а с помощью собственных движений тел в сопротивляющейся эфирной среде, но опять-таки — без заметного успеха².

¹ „Thomson's Annals of Philosophy", XVII, 1821 г.; „Mathematical Physics", London 1847.

² „Recherches sur les lois de physique considérées comme des conséquences des seules propriétés essentielles de la matière, l'impénétrabilité et l'inertie", „Comptes rendus", XXIX, стр. 107, 1849. „Не является ли движение в сопротивляющейся среде, — говорит Бушепорн, — условием и причиной всеобщего тяготения? Все притягивающие и отталкивающие тела находятся в движении,

СТАРЫЕ ГИПОТЕЗЫ О ПРИЧИНАХ ТЯГОТЕНИЯ 227

В 1852 г. Г. Ламе¹, не выдвигая никакой определенной теории, с большой определенностью высказался в пользу кинетического объяснения физических сил. «Существование некоторой эфирно-жидкой среды, — говорит он, — неоспоримо доказано... Если эта жидкость и не является единственным источником всех наблюдаемых явлений, то она, по меньшей мере, должна их видоизменять, способствовать их передаче и осложнять их законы. Без допущения этого агента, присутствие которого неизбежно, невозможно достичь полного и рационального объяснения явлений физической природы. Нет сомнения, что такое допущение, умело проведенное, позволит открыть тайну или истинную причину тех эффектов, которые приписываются теплоте, электричеству, магнетизму, всеобщему тяготению, сцеплению и химическим силам, так как все эти таинственные и непонятные сущности в действительности являются только целесообразными гипотезами, которые, несомненно, полезны при настоящем нашем неведении, но должны: исчезнуть в результате успехов истинного знания».

В 1858 г. Уотерстон присоединился к последним идеям Фарадея о *материальности пространства* и приписал непосредственно последнему силы, действующие в каждой его точке².

С 1859 г. Челлис³ начал теоретически разрабатывать *волнообразную теорию тяготения*. Согласно последней физические силы имеют своим источником движение упругой непрерывно заполняющей все пространство среды, которую мы называем эфиром. Если на пути эфирных волн попадает совершенно гладкий шар, то в случае, когда ширина волн весьма мала по сравнению с диаметром шара, последний движется в направлении распространения волн и, наоборот, когда ширина волн весьма велика, шар движется в противоположном направлении. В первом случае получается видимость отталкивания, во втором — притяжения по направлению к месту возникновения волн.

как это теперь выяснилось и относительно солнца. Когда тело *A* движется, то эфир, устремляющийся в оставленное телом пространство, вызывает во всех частях жидкости некоторого рода тягу (*aspiration*) по направлению к точке, которую только что оставил центр тела. Каждое другое тело *B*, получающее со стороны, обращенной к *A*, эти присасывающие волны, теряет тогда полностью или частично свое собственное давление (*pression propre*); половина давления, $\frac{1}{2}nv$, действующая с противоположной стороны, уже более не уравновешивается противодействующим давлением, и тело *B* движется по направлению к *A*". Д-р Кремерс в „Fortschr. der Physik", V, стр. 18, говорит об этой работе Бушепорна следующее: „Ближайшее рассмотрение доказательств, приведенных в пользу этого воззрения, было бы, пожалуй, излишним уже потому, что это воззрение не ново, а также и потому, что оно отнимает у материи нечто такое, что одно только может обусловить гармонию".

¹ Из „Leçons s. 1. théorie math. de l'élasticité d. corps solides" (Paris 1852), по „Pogg. Ann.", доп. том VI, стр. 97. Gabriel Lamé (1793—1870) — профессор Парижского университета.

² „Philosophical Magazine" (4), XV, стр. 329. И. Шлезингер („Substantielle Wesenheit des Raumes und der Kraft", Wien 1885. „Die geistige Mechanik der Natur", Leipzig 1888) вновь вернулся к этому представлению, но, как показывает последнее его сочинение, скорее из *спиритических*, чем физических, соображений.

³ „Philosophical Magazine" (4), XVIII, стр. 321 и 442, 1859; XIX, стр. 89, 1860 и сл. Также „Principles of Mathematics and Physics", Cambridge 1869.

Отталкивание действует обратно пропорционально четвертой, а притяжение — второй степени расстояния.

Эти все чаще появляющиеся теперь волнообразные теории сил имели некоторое опытное основание в так называемом *акустическом отталкивании и притяжении*, впервые воспроизведенном Гюйо в 1834 г.¹ Гюйо подвесил на нитке вблизи поперечно колеблющегося стержня маленький бумажный квадратик и установил, что всякий раз, когда плоскость бумажного квадратика была параллельна плоскости колебаний стержня, квадратик притягивался и, наоборот, когда обе плоскости были перпендикулярны друг к другу, он отталкивался. Эти явления были заметны еще на расстоянии девяти линий. После работ Челлиса и Гюйо обратился к тем же идеям, и в 1861 г.² он объяснил все притяжения и отталкивания между весомыми телами происходящими между ними сгущениями и разрежениями эфира, вызываемыми поперечными колебаниями последнего. Шельбах в 1870³, из наблюдений над наполненным газом шаром, помещенным в звучащем воздухе, вывел закон, что звуковые колебания упругой среды увлекают тела с большим удельным весом к центру колебаний и отталкивают от него тела с меньшим удельным весом. Наконец, Дворак в 1878 г.⁴ доказал, что при известных условиях резонаторы отталкиваются от источников звука, и устроил даже акустическое вращающееся колесо. Таким образом, опять-таки пришли к силам поступательного движения, вызываемым волнообразными движениями, о которых у нас речь будет ниже. В 1863 г. Ф. и Эм. Келлер⁵, а в 1869 г. Лекок де-Буабодран⁶ пытались объяснить тяготение не поперечными, а *продольными колебаниями эфира*. По Буабодрану доходящие до весомой материи продольные колебания эфира частью превращаются в поперечные световые или тепловые колебания и потому становятся по своему действию слабее вновь прибывающих продольных колебаний. Так как в промежутке между двумя весомыми атомами это ослабление бывает сильнее, чем в прочих тестах, то под влиянием внешних эфирных колебаний атомы сближаются между собой как бы под действием некоторой притягательной силы. Пушль⁷ пришел к выводу, что попадающие на тело эфирные колебания, в зависимости от рода последних, вызывают различные силы, а именно: поперечные колебания, как увеличивающие расстояния

¹ „Ann. de chim. et de phys.“ (2), LV, стр. 200, 1834; „Pogg. Ann.“, XXXI, стр. 640, 1834; „Des mouvements de l'air et des pressions de l'air en mouvements“, Paris 1835.

² „Presse scientifique“, III, стр. 130, 1861.

³ „Pogg. Ann.“, CXXXIX, стр. 670; CXL, стр. 325, 1870. С наблюдениями над шарами согласуются также и другие явления. Так, у отверстия резонансного ящика, на котором был помещен звучащий камертон, бузинный шарик притягивался, а пламя отталкивалось. К. Н. Schellbach (родился в 1805 г.) — преподаватель гимназии в Берлине.

⁴ „Pogg. Ann.“, CLVII, стр. 42, 1876; „Wied. Ann.“, III, стр. 328, 1878. Около этого же времени исследованием акустических притяжений занимался и Гутри („Philosophical Magazine“, XXXIX, стр. 309; XL, стр. 345, 1870).

⁵ „Comptes rendus“, LVI, стр. 530, 1863.

⁶ Там же, LXIX, стр. 703, 1869.

⁷ „Wiener Akad. Berichte“, IX, стр. 173, 1852; XV, стр. 279, 1855; LXI, 2 отдел, стр. 299, 1870.

ЭФИРНО-УДАРНАЯ ТЕОРИЯ 229

между частицами, вызывают притяжение, а продольные колебания — отталкивание. Следовательно, каждое теплое тело в небесном пространстве должно, благодаря испусканию тепловых лучей, вызывать кажущееся притяжение. Однако такое тепловое притяжение, будучи прямо пропорционально поверхности притягиваемых тел и обратно пропорционально их массе, становится незначительным для тел большой массы, и вызываемое солнцем тепловое притяжение земли составляет, во всяком случае, только очень малую часть тяготения.

Около этого же времени Лерэ¹ снова противопоставил волнообразным теориям тяготения *эфирно-ударную теорию*, составленную совершенно в духе Лесажа. Он допустил, что через каждую точку пространства проходит во всевозможных направлениях бесчисленное множество эфирных потоков, движения которых при прохождении через весомые вещества поглощаются пропорционально массам последних. Непосредственно к системе Лесажа вернулся около 1872 г.² У. Томсон, а потом к ней присоединился и Г. Тэт³. Томсон, однако, полагал, что система Лесажа требует некоторой поправки, а именно, нельзя согласиться с мыслью Лесажа, что энергия вызывающих тяготение атомов эфира вследствие их взаимных столкновений постепенно, хотя и в очень незначительной доле, уменьшается, а следует, наоборот, искать возмещения для этой энергии. С этой целью он вводит допущение, сделанное уже Клаузиусом в теории газов и состоящее в том, что энергия поступательного движения атома не представляет еще собой всей энергии атома; последняя состоит еще из колебательной и вращательной энергии, и все эти различные виды энергии способны превращаться друг в друга. После такого дополнения лессажевская теория тяготения, по мнению Томсона, не вызывает уже больших трудностей, чем кинетическая теория газов⁴.

После того как в пользу кинетической теории тяготения высказались многие физики⁵, и между ними такие крупные авторитеты, как Томсон и Тэт, остальные физики также почувствовали потребность занять определенную позицию в этом вопросе; однако в большинстве случаев они, в конце концов, приходили только к более или менее благожелательному нейтралитету. Так как никто не отрицал ньютоновских законов тяготения, то реальное существование силы тяжести никогда не вызывало сомнения; быть может, ей только было присвоено непра-

¹ „Comptes rendus" LXIX, стр. 615, 1869.

² „Proceed, of the Roy. Soc. of Edinburgh", VII, стр. 577, 1872.

³ „Vorlesungen über einige neuere Fortschritte der Physik", стр. 248, Braunschweig 1877.

⁴ Томсон говорит буквально следующее („Proc. of the R. S. of Edinburgh", VII, стр. 588): „Корпускулярная теория тяжести не труднее в своих исходных допущениях, чем принятая теперь кинетическая теория газов, и она более полна, поскольку, исходя из основных допущений крайне простого характера, она объясняет все известные явления этого рода, чего нельзя сказать о кинетической теории газов, по крайней мере в нынешнем ее состоянии".

⁵ Мы могли упомянуть здесь только небольшую часть появившихся в то время, обычно небольших, статей о причине тяготения; оставшиеся неупомянутыми статьи не содержат в себе принципиально ничего такого, что выходило бы за пределы изложенного выше.

230 ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ ЗАКОНОВ НЬЮТОНА И ВЕБЕРА

вильное название. Астрономы и особенно физики-математики, исследовавшие действия этой силы, считали вопрос о причине тяготения выходящим за пределы их сферы и не могли проявить к нему какого-либо дальнейшего интереса. Были еще и другие физики, которые по различным основаниям упорно продолжали считать тяготение первичной силой и отрицали возможность существования какой-либо дальнейшей причины тяготения. Наиболее ревностным из них был Целльнер¹; однако даже и он не мог остаться просто при старых взглядах, не внося в них никаких изменений.

Целльнер был безусловным приверженцем основного веберовского электрического закона, согласно которому взаимодействие двух электрических частиц зависит не только от их массы и расстояния, но также от скорости и даже ускорения действующих частей. А так как Целльнер при этом придерживался и закона сохранения энергии и вследствие того стоял на точке зрения единства всех сил природы, то ему не оставалось ничего другого, как допустить и для тяготения, которое должно было сохранить свой старый характер элементарного действия на расстоянии, — зависимость его от состояния движения тяготеющего тела и, таким образом, *отождествить закон тяготения с основным электрическим законом Вебера*. Вебер уже сам в первой своей работе 1846 г. отметил, что распространение его закона на явления тяготения может дать для числовых значений движения весомых масс и даже для небесных тел только ничтожные отклонения, совершенно ускользающие от нашего наблюдения. В 1864 г. Зегер² произвел соответствующие исчисления для движений и возмущения планет, но не опубликовал никаких численных результатов. Эти последние, основанные на расчетах проф. Шейбнера, впервые сообщил Целльнер в своей книге «Über die Natur der Cometen», Leipzig 1872 («О природе комет»). Из них следует, что если воспользоваться веберовским законом вместо ньютоновского и принять веберовское число для постоянной c , то, хотя и получаются некоторые небольшие отклонения для движения Меркурия, а именно, вековое изменение его перигелия в 6,75 дуговых секунд, но для Венеры соответствующее изменение достигает только 1,43 дуговых секунд, а для других планет оно совершенно исчезает³. Из этого Целльнер сделал тот вывод, что тяготение может быть отождествлено с электрическими силами не только по законам его действий, но и по самой его природе. Поэтому он сделал допущение, что кроме инерции и непроницаемости материальным частицам присущи только силы разнородных электричеств, а для того чтобы из них вывести тяготение, он еще допустил⁴, что потенциал двух

¹ Joh. Karl Friedr. Zöllner (1834—1882) — профессор астрономии в Лейпциге. С начала семидесятых годов ревностный приверженец спиритизма.

² „De motu perturbationibusque planetarum secundum legem electrodynamicam Weberianam solem ambientium“, Göttingen 1864.

³ Почти к тождественным выводам пришел и Тиссеран в статье: „Sur le mouvement des planètes autour du soleil d'après la loi électrodynamique de Weber“ („Comptes rendus“, LXXV, стр. 760, 1872).

⁴ „Principien einer elektrodynamischen Theorie der Materie“, стр. XII, Leipzig 1876.

ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ ЗАКОНОВ НЬЮТОНА И ВЕБЕРА 231

разнородных притягивающихся электрических частиц на очень малую величину (менее чем на $1/6 \cdot 10^{10}$) превышает потенциал двух однородных отталкивающихся частиц. Таким образом, силы природы сохранили полностью свой прежний характер элементарных причин, действующих непосредственно на расстоянии, но только независимость их от состояния движения действующих масс была признана Целльнером невозможной. Согласно ньютоновскому закону притяжения потенциал двух атомов, находящихся на расстоянии r друг от друга и имеющих массы m и m' , равен mm'/r . Если допустить, как это обычно делается в математической физике, что массы атомов сосредоточены в одной точке, то атомы могут сблизиться на бесконечно малое расстояние и тогда их потенциал может достигнуть бесконечно большой величины, следовательно, в каждом конечном количестве весомой материи должно было бы содержаться неограниченное количество потенциальной энергии, бесконечно большая работоспособность. *Так как последнее невозможно, то ньютоновский закон притяжения следует рассматривать лишь как первое приближение к истинному, т. е. веберовскому, закону.* Согласно последнему потенциал двух масс выражается через $(m \cdot m'/r)(1 - v^2/c^2)$, а эта формула показывает, что возрастание потенциала с уменьшением расстояния все более уравновешивается увеличением скорости v , так что величина потенциала может достигнуть только некоторого конечного максимального значения, зависящего от веберовской постоянной c .

Целльнер оправдывает Ньютона в установлении его закона, указывая, что Ньютон применял его только к телам, находящимся на измеримом расстоянии друг от друга, и потому и не нуждался в веберовской поправке; но в настоящее время, — подчеркивает Целльнер, — когда этот закон желают применить к атомам, находящимся на неизмеримо малых расстояниях, следует применять только веберовскую форму этого закона ¹. При этом интересно, что Целльнер не заметил или не придавал значения *внутреннему неразрешимому противоречию* между сохраненным им *непосредственным действием на расстоянии* и принятой им *зависимостью действия от состояния движения*. Объясняется это только тем, что *Целльнер все-таки допускал существование причины для всякого материального непосредственного действия на расстоянии, но только вместо материальной причины он принимал причину нематериальную, и как раз эта мнимая деятельность сверхчувственного особенно и привлекала Целльнера*. Во взаимном притяжении двух тел он тоже видел не простую притягательную силу, действующую на материю извне, а скорее некоторое *стремление тел* к соединению, основы которого заложены внутри каждого тела. Обладая более острой мыслью, чем некоторые другие, пытавшиеся найти решение загадки в указанном стремлении, Целльнер даже утверждает,

¹ „Principien einer electrodyn. Theorie der Materie“, стр. XX, Leipzig 1876.

232 ТЕОРИИ ЭФИРНОГО ДАВЛЕНИЯ

*что стремление двух тел к соединению невозможно без взаимного чувства между ними; поэтому он приписывает каждому веществу ощущения и чувства удовольствия и неудовольствия, которые уже и возбуждают в веществе притягательные или отталкивательные стремления*¹. Таких взглядов придерживался не один Целльнер, — многие философы и физиологи, непосредственно опираясь на Лейбница и на его учение о монадах, пытались разрешить, по крайней мере, в своей области, тайну психических явлений в организмах допущением одухотворенности всякой, даже и неорганической материи². Физики же, наоборот, видели в таком одухотворении материи не объяснение сил, действующих непосредственно на расстоянии, а скорее повышение загадочного в этих силах до степени чудесного; вследствие этого попытки кинетического объяснения тяготения не только не уменьшились, но, напротив, умножились.

Работы, появившиеся до этого времени в данной области, исчерпали уже все возможные решения. Действие одного тела на другое при посредстве промежуточной среды может заключаться либо в давлении, либо в ударе; при этом следует особо различать, передается ли давление поступательными или колебательными движениями частиц среды. Все эти возможные случаи в семидесятых и восьмидесятых годах вновь подверглись обсуждению, более широкому и глубокому, чем прежде.

Первая очередь была, по-видимому, за теориями эфирного давления. Ф. Шпиллер, работавший уже с 1855 г. над объяснением всех физических явлений на основе единого начала и над ниспровержением «призрака невесомых» («Phantom der Imponderabilien»), закончил в 1876 г.³ свои исследования в этом направлении. По представлению Шпиллера все мировое пространство заполнено составленным из атомов совершенно упругим эфиром, который имеет равное напряжение по всем направлениям, или повсюду находится под одним и тем же давлением. Для двух находящихся в таком эфире шарообразных весомых атомов все силы давления, лежащие внутри двух плоскостей, проведенных через центры атомов перпендикулярно к линии, соединяющей эти центры, должны уравниваться; силы же давления, действующие вне этих плоскостей, не имеющие противодействия, должны создавать кажущееся тяготение между обоими атомами. Однако Изенкраге в упоминаемой ниже работе «Das Rätsel von der Schwerkraft» («Тайна тяготения») показал, что выравнивание давления, как его принимает Шпил-

¹ Там же, стр. XLV—LXVII.

² Лотце в своем „Mikrokosmos" I, стр. 398, Leipzig 1877, говорит: „Каждое давление и каждое натяжение, которое испытывает материя, — покой устойчивого равновесия и уничтожение существовавшей связи — все это не только происходит, но вместе с тем является источником наслаждения". Геккель в своей „Perigenesis der Plastidule", стр. 37, Berlin 1876, пишет: „Удовольствие и неудовольствие, желание и нежелание, притяжение и отталкивание должны быть общи всем массам и атомам; движения атомов, которые имеют место при образовании и разложении всякого химического соединения, только тогда становятся понятными, когда мы им приписываем ощущение и волю".

³ „Die Urkraft des Weltalls", Berlin 1876 — Ph. Spiller (1800 — 1879) — профессор в Берлине.

ТЕОРИЯ АНДЕРСОНА 233

лер, не может иметь места и что во всякой упругой жидкости никакое находящееся в покое тело не может помешать распространению статического давления, как это видно также из выравнивания давления газа между твердыми телами ¹.

Более кинетически объяснил распространение эфирного давления А. Андерсон в своем сочинении «Die Theorie vom Massendruck aus der Ferne», Breslau 1880 («Теория давления масс на расстоянии»). Согласно его представлению каждое космическое тело излучает во все стороны известную отталкивательную, центробежную силу, которая при посредстве все наполняющего и все проникающего эфира передается на любые расстояния. Но распространение давления происходит здесь не так, как у Шпиллера, без участия движения, а напротив, толчками, благодаря волнообразным движениям эфира, следующим, однако, столь быстро друг за другом, что их действие можно рассматривать как непрерывное давление. Так как каждое мировое тело окружено со всех сторон другими мировыми телами, то оно испытывает со всех сторон давление, которое, будучи рассматриваемо со стороны самого тела, является как бы центростремительной силой, или притяжением этого тела.

Андерсеновская теория является как бы прямой противоположностью гипотезе тяготения, перед которой она имеет преимущество наглядного изображения действий и аналогии с тепловым и световым излучением нагретых тел. Однако и здесь, как в теории Ньютона, действительный источник действия остается неуловимым, а образование равного во все стороны земного тяготения и молекулярного притяжения из бесконечно большого числа слагающих давлений представляется, во всяком случае, очень мало наглядным. Поэтому все больше стали склоняться к тому, чтобы причину тяготения искать не в весомой материи, а в эфире или в материи вообще.

Одним из наиболее радикальных новаторов в этой области является Деллингсгаузен, который, видоизменяя постепенно в ряде статей свои взгляды и исправляя их в соответствии со сделанными возражениями, изложил их в окончательном виде в 1884 г. ². *Он определяет здесь материю как общий, лежащий в основании всех тел, одинаковый, неизменный и невесомый субстрат, в котором различия и видоизменения могут быть вызваны только движениями и который можно представлять себе не иначе, как находящимся в движении.* Предполагать в этой материи атомы и молекулы было бы произвольной, ни на чем ни основанной и притом бесцельной гипотезой; *поэтому необходимо представлять себе материю совершенно непрерывной* (по крайней мере, в смысле отрицания произвольно поставленных границ). Для дедуктивного построения всех мировых явлений следовало бы, прежде всего, знать внутренние движения этой материи, а так как последние нельзя узнать непосредственно, то следует из наблюдения внешних движений умозаключить

¹ „Das Rätsel von der Schwerkraft“, стр. 44—49, Braunschweig 1879.

² „Kosmos“, red. von B. Vetter, XIV, стр. 267, 336, 427; XV, стр. 35, 1884. „Grundzüge einer Vibrationstheorie der Natur“, Reval 1872; „Das Rätsel der Gravitation“, Heidelberg 1880. — Барон N. Dellingshausen — уроженец Эстонии.

о внутренних¹. Световые и тепловые явления показывают, что всякая материя находится в колебательном движении, которое распространяется в ней волнообразно. Отсюда можно заключить, что внутренние движения материи, в силу ее непрерывности, являются круговыми движениями, составленными из отдельных элементарных колебаний. Эти внутренние движения, складываясь с внешними движениями тела, превращаются в *винтообразные*, которые всегда могут быть вновь разложены на *вращательные* и *поступательные* движения. Каждая точка описывает при этом свою собственную траекторию, и координаты двух точек для какого-нибудь момента времени, как бы близко эти точки ни лежали друг от друга, никогда не могут быть равны между собою; таким образом, точки взаимно исключают друг друга и создают то состояние, которое до сих пор называли *непроницаемостью* и которое в действительности основывается только на гармонии внутренних движений². В материи не существует *никакой упругости*, каждая точка смещает и испытывает смещение; нет необходимости и в *инерции* для поддержания этого движения, так как непрерывное его существование основывается на полной взаимности всех действий, вследствие чего ни одна точка не может внезапно остановиться. Так как мы можем представить себе, что из каждой точки пространства исходят колебания, в каждой точке пространства должно встречаться бесчисленное множество волн. Эти встречающиеся волны могут в некоторых местах образовать *стоячие волны*. Такие части пространства, где образуются подобные стоячие колебания, получают тогда известную устойчивость — они образуют тела. *Пограничная, или внешняя, поверхность тела — это поверхность, которая отделяет друг от друга стоячие колебания различной интенсивности и продолжительности и на которой, следовательно, отражаются проходящие через тело колебания*. Так как материя, сплошь заполняющая собою все пространство, не может быть ни сжата, ни разрежена, то *увеличение или уменьшение объема тел объясняется только увеличением или, соответственно, уменьшением того пространства, в котором происходят внутренние колебания*³. Само собою разумеется, что при этом

¹ Без математики, — говорит Деллингсгаузен, — здесь можно достигнуть лишь немногого. Но так как при установлении связи между явлениями природы дело идет не столько о формах движения, сколько о передаче и превращении энергии, то он еще надеется достигнуть цели. — Разумеется, эта надежда должна быть слабой, так как и превращение движений зависит, прежде всего, от их формы.

² Такое утверждение является только простой перефразировкой понятия непроницаемости.

³ Согласно кинетическому учению о природе даже *поступательное движение* тел объясняется не перемещением материи, а только *распространением движений*. Подобную гипотезу высказал Гельм в 1881 г. в „Wiedem. Ann.“ (XIV, стр. 153): „Таким образом, я допускаю, что молекулы представляют собою малые объемы (в изотропных телах, о которых здесь только идет речь, они представляют собою шарики), заполненные тем же самым веществом, эфиром, который, заполняя непрерывно все пространство, находится также и вне их. Это вещество в свободном мировом пространстве имеет иную степень подвижности, чем вблизи молекул или чем в самих молекулах. Вне молекул вещество движется по дифференциальным уравнениям упругих жидких тел, но постоянные уравнения движения различны для случая движения в свободном пространстве и вблизи молекул... В молекулах, согласно моему допущению, вещество движется

ЧИСТО КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ МАТЕРИИ ДЕЛЛИНГСГАУЗЕНА 235

должна происходить затрата или же выигрыш работы. Наиболее важным пунктом для «кинетического учения о природе», как называет Деллингсгаузен свою теорию, является объяснение потенциальной энергии, присущей телам под видом энергии положения, химической энергии и т. д. Приверженцы старой теории тяготения объясняли эти запасы энергии в телах центральными силами, не указывая, однако, каким образом эти последние проявляют свою деятельность. Эфирно-ударные теории считают возможным обойтись совершенно без потенциальной энергии и должны, поэтому отказаться от объяснения многих явлений природы. По мнению Деллингсгаузена *только на основе его кинетического учения о природе можно ясно и наглядно показать истинное значение потенциальной энергии, так как нельзя ведь не признать, что эта энергия есть не что иное, как энергия движений, интерферирующих внутри тел и взаимно уравнивающих в их действиях вовне.* Таким образом, например, сообщенные телу во время перехода его из одного агрегатного состояния в другое тепловые движения приходят в положение непрерывной интерференции и благодаря этому остаются неуловимыми для осязания и для термометра, т. е. сообщенная теплота обращается в потенциальную энергию. При конденсации паров, напротив, внутренние движения перестают интерферировать между собою; таким же образом запас работы, который обуславливает взрыв гремучего газа и теплоту сгорания водорода, содержится уже в составных частях воды перед их соединением как энергия интерферирующих движений, и этот запас только выходит из состояния интерференции при взаимном соединении газов. Точно так же и оба рода электричества состоят из внутренних движений, которые в обыкновенном состоянии взаимно друг друга уравнивают, но интерференция которых прерывается вследствие трения или химических процессов¹.

Неизвестный по своей природе субстрат материи является также основой и мирового эфира, который следует представлять себе в виде газа, может быть, наиболее совершенного из всех газов², находящегося при температуре, близкой к абсолютному нулю, и под весьма незначительным давлением. Поэтому происходящие в каждой его точке движе-

по дифференциальным уравнениям жидких тел... Эфир вне молекул я буду кратко обозначать твердым, а внутри их жидким... Я могу тогда молекулу коротко обозначить как место в пространстве, где эфир обращается в жидкость; если последний движется, то вместе с ним движется и причина этого обращения в жидкость, и те места, которые раньше были твердыми, становятся жидкими и обратно".

¹ Свое определение потенциальной энергии как энергии интерферирующих движений Деллингсгаузен считает *капитальным достижением* и противопоставляет его кинетической атомистике и эфирно-ударной теории, которые якобы не в состоянии дать такого объяснения. Последнее утверждение, по-видимому, необоснованно, так как и обе эти теории тоже могут объяснить потенциальную энергию внутренними движениями, которые при частичном заполнении пространства материей, принимаемом обеими теориями, не проявляют своих действий наружу. *Только освобождение потенциальной энергии и превращение ее в кинетическую, по-видимому, легче поддается объяснению у Деллингсгаузена, чем в кинетической атомистике.*

² О различии агрегатных состояний Деллингсгаузен далее ничего не говорит; поэтому трудно понять, как следует их понимать с точки зрения его теории.

236 ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ И ТЯГОТЕНИЕ

ния должны настолько уравниваться, чтобы образовать стоячие колебания, т. е. *мировой эфир должен представлять собою заполненную стоячими колебаниями среду, которая в силу присущей ей исключительно лишь потенциальной энергии представляется нам как бы пустой и лишенной сопротивления.* Если бы в мировом пространстве находился лишь только один эфир, то он навсегда сохранил бы такое состояние, но его изменяют рассеянные в эфире тела. Так как последние поглощают световые и тепловые волны и вообще все проникающие в них эфирные колебания, обращая их во внутренние движения, которые уже не оказывают действия наружу, то тела тем самым отнимают у других эфирных волн необходимые для образования стоячих волн, составляющие и в дальнейшем колебание эфира, продолжается в виде поступательного волнообразного движения. Таким образом, под влиянием космических тел мировой эфир испытывает глубокие изменения: он перестает быть наполненным исключительно стоячими колебаниями, а пронизывается в направлении к различным телам вселенной многократно пересекающимися потоками бегущих волн, которые и вызывают тяготение по направлению к этим телам. Однако не эти волны тяготения служат источником живой силы при столкновении тел: они дают только повод к падению; разрушая стоячие колебания внутри тела, они лишь освобождают те силы, которые вызывают ускоренное движение падающих тел. *Итак, следует отметить, что эфир не является непосредственной причиной тяготения, он только создает условия, при которых освобождается собственная энергия тел, т. е. происходит превращение потенциальной энергии в кинетическую энергию падения*¹. При этом, однако, энергия падения должна быть пропорциональна энергии волн тяготения, потому что энергия последних должна, во всяком случае, зависеть от поглощательной способности своего центрального тела по отношению к падающим на него волнам. Из равенства ускорений всех тел на земле следует заключить, что весомые тела отнимают у протекающих через них волн тяготения количества энергии, пропорциональные массам этих тел, а так как это заключение применимо в самом общем виде, то можно сказать вообще, что энергия волн тяготения

¹ Этим сложным построением Деллингсгаузен надеется доказать полную несостоятельность эфирно-ударных теорий, так как согласно их предпосылкам энергия, сообщаемая падающему телу равномерно текущими потоками эфира, должна была бы быть пропорциональной времени, между тем как в действительности она возрастает пропорционально квадрату времени. Однако совершенно так же, как эфирно-ударным теориям, этот упрек можно было бы сделать и всем прежним теориям тяготения, открытиям Галилея, Ньютона и т. д. и, наконец, теории самого Деллингсгаузена. В самом деле, если падающие тела развивают свою кинетическую энергию за счет собственных ресурсов, то здесь еще скорее можно было бы допустить, что это происходит пропорционально времени, а не квадрату последнего. *Затруднение, с которым здесь встречается Деллингсгаузен, везде одно и то же, и заключается оно в том, что он принимает энергию за нечто первичное, передающееся при ударе и развивающееся при падении, между тем как мы в первую очередь можем говорить лишь об образовании разностей скоростей, которое протекает пропорционально времени и именно этим обуславливает нарастание энергии пропорционально квадрату времени.*

всегда должна быть пропорциональной массе своего центрального тела ¹. При концентрическом распространении волн тяготения свое действие по созданию тяжести может проявить только та часть этих волн, которая доходит до весомого тела; а так как эти волны при своем распространении по направлению к какому-нибудь определенному мировому телу переносят свои движения на все увеличивающиеся шаровые поверхности, то их энергия по расчету на постоянную площадь или внутри постоянного объема уменьшается в обратном отношении к квадрату радиуса этих шаров или к квадрату расстояния от центра тела. Тем самым доказано, что и при кинетическом учении о природе тела в своих движениях подчиняются ньютоновским законам.

В заключение своей работы Деллингсгаузен говорит ²: *«Явления природы суть явления движения. В этом заключается единство естествознания. Многообразие явлений основывается на разнообразии движений, которые могут возникать и исчезать. Вечна только энергия... Конечная цель всякого изучения природы должна была бы, разумеется, состоять не в одном только доказательстве эквивалентности превращений, но также в выяснении характера движений в телах, как это уже сделано в волновой теории света. Однако от этой цели наука, уже в силу разнообразия данных явлений, еще весьма далека; кроме того, поставленная здесь задача может быть выполнена только с помощью математики»*. Несмотря на признанную самим Деллингсгаузенем неполноту своей теории, он все же полагает, что сделал немалый шаг по пути к истинному познанию природы. *«Отныне ³, — пророчествует он далее,— можно с уверенностью предсказать крушение атомистики... Будущие исследователи природы... оставят атомистику и обратятся к тому учению, которое без искусственных вспомогательных средств, без атомов, без сил и невесомых могло дать то, над чем в течение 3000 лет тщетно работала атомистическая теория. Это учение и есть то чисто кинетическое учение о природе, которое изложено в настоящем сочинении... Ближайшая задача кинетического учения о природе заключается, однако, в том, чтобы все изложенное в настоящем сочинении на словах воспроизвести в математической форме»*.

¹ Понятие о *массе* при однородности материи представляет, конечно, для Деллингсгаузена свои особые трудности, поэтому он заменяет его понятием *количества движения* тела. Однако, так как в обычное определение последнего входит опять-таки масса, то он определяет *количество движения только как произведение скорости, объема и некоторого постоянного множителя*; а так как этот множитель есть не что иное, как плотность, зависящая опять-таки от понятия о массе, то, в конце концов, он определяет массы лишь как *„эмпирические, выведенные из наблюдаемого веса коэффициенты, служащие для установления эквивалентности между работоспособностью и живою силою тел“* („Kosmos", XIV, стр. 439). Сущность массы определена при этом, конечно, правильно, но вывод ее из установленного автором понятия о материи, во всяком случае, не дан и даже не показана вероятная возможность такого вывода, что в данном случае представлялось бы прямо необходимым, принимая во внимание трудность этого вопроса как раз для теории непрерывного заполнения пространства материей.

² „Kosmos", XV, стр. 43.

³ „Kosmos", XV, стр. 49.

238 ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ НОВОЙ ТЕОРИИ

Деллингсгаузен был бы, может быть, прав в своем пророчестве, если бы только последнее его требование было так же легко выполнить, как высказать. Его работа содержит в себе много верного и имеет много достоинств. Построение материи исключительно на основе движения составляет идеал физики; объяснение потенциальной энергии, построение тел без всякого применения элементарных сил представляют собою значительные достижения. При всем том его теория не только очень мало разработана с математической стороны, но не содержит в себе даже ясных положений для математической разработки; поэтому о математическом подтверждении ее едва ли приходится думать. В этом отношении Деллингсгаузен, вопреки его словам, далеко не сделал того, чего достигло старое учение о природе с помощью своих атомов, сил и невесомых сред. Легко представить себе и математически выразить движение какого-нибудь отдельного атома в пустом пространстве; но каким образом могут происходить отдельные движения в деллингсгаузеновской однородной, несжимаемой и непрерывной материи, в обсуждение этого вопроса он и сам не входил. Однако до тех пор, пока математик не выведет волнообразных движений в деллингсгаузеновской материи и их интерференции из простых уравнений движения, вся эта теория останется для физики не чем иным, как продуктом поэтической фантазии.

К числу физиков, которые подобно Деллингсгаузену, объясняли тяготение при помощи колебаний, принадлежат также С. Тольвер Престон¹ и Гуго Фритч²; однако оба они в противоположность Деллингсгаузену — атомисты и допускают существование двух начальных материй: вызывающей тяготение, эфира, и тяжелой, или весомой, материи. При этом Фритч пытается обойти опасность допущения упругих атомов, предполагая их абсолютно твердыми, т. е. неизменными по форме.

Своеобразное положение между обеими теориями тяготения, волнообразной и теорией давления, попытался занять А. Секки³, который, подобно Деллингсгаузену, отнесся к задаче построения материи глубже

¹ „Physics of the Ether“, London 1875.

² „Programm d. Realschule in Königsberg“, 1874 и 1876. В 1886 г. («Programm des Städt. Realgymn. in Königsberg») Фритч снова изложил свои взгляды в несколько измененной форме, вызванной, вероятно, работами на эту тему, появившимися за истекшее время. Все материальные частицы наполняют пространство без промежутков. Эфирные частицы не тверды, а могут при столкновении друг с другом делиться на части. Гораздо большие весомые частицы получают свою твердость только вследствие ударов эфирных частиц. Видимая упругость происходит вследствие того, что в непроницаемой материи ни одно движение не может исчезнуть.

³ „L'unità delle forze fisiche“. Впервые появилась в 1864 г.; переведена на немецкий язык: „Die Einheit der Naturkräfte“, Leipzig 1876. — Angelo Secchi (1818—1878) первоначальное образование получил в иезуитской школе; в 1839 г. поступил в общество Иисуса; свое научное образование получил в Collegio Illirico-Lauretano в Лоретто и в Джорджтауне в Северной Америке; был профессором математики и физики в Джорджтауне, потом в Collegio Romano и в Лоретто; после изгнания иезуитов из Италии жил в Стоннгерсте в Англии, а потом снова в Джорджтауне; по возвращении иезуитов был профессором астрономии в Collegio Romano и директором обсерватории; позднее был также профессором физической астрономии в римском университете; умер в Риме 26 февраля 1878 г.

ТЕОРИЯ МАТЕРИИ СЕККИ 239

своих предшественников, но остался на почве атомистики. Согласно Секки пространство *прерывно* и заполнено *отдельными, независимыми и непроницаемыми атомами, способными к движению, но не заключающими в себе никакой внутренней силы, ни упругой, ни отталкивательной*. Этим атомам свойственно не только *поступательное*, но и *вращательное движение*. Так как Пуансо ¹ доказал, что твердые неупругие тела, имеющие вращательное движение, при ударе отскакивают друг от друга так же, как упругие, а часто даже с большею скоростью, то и эти неупругие атомы могут все-таки при своих взаимных столкновениях давать те же явления, как и вполне упругие ². Положим, что в пространстве, наполненном такими атомами, находится центр сотрясений, из которого эти последние непрерывно расходятся во все стороны. Такой центр будет толкать атомы вперед, они будут сталкиваться с другими атомами, отражаться от них под косыми углами, приводить в движение новые атомы и распространять это движение в шарообразном пространстве. Материя, таким образом, оттесняется от центра наружу, и плотность ее в этом направлении убывает до бесконечных расстояний. Представим себе теперь в пространстве два центра сотрясений *A* и *B*; на соединяющей их прямой *AB* должно находиться меньше материи, чем вне ее; удары же движущихся атомов будут действовать на центры колебаний подобно притягательной силе в направлении *AB*. Так как сила ударов должна быть пропорциональна массе, а, следовательно, плотность материи должна убывать обратно пропорционально квадрату расстояния, то по этому же закону должна действовать и кажущаяся сила притяжения. Самые *центры сотрясения* можно представлять себе двояким образом. Либо они состоят из некоторой *первичной материи*, которая отличается от *эфира* тем, что ее атомы обладают *большею массой, большим объемом и более интенсивными движениями*, или же (что в теоретическом отношении гораздо более интересно) эти центры представляют собою только *соединения эфирных атомов*. Для образования таких сложных единиц не требуется

¹ „Dynamische Untersuchungen über den Stoss der Körper“ (по франц. в „Liouv. Journal“, стр. 291; 1857; нем. перев. в „Schlömilch's Zeitschr. f. Math. u. Phys.“, III, стр. 143 и 274; 1858). В этом сочинении („Zeitschr. f. Math. u. Phys.“, III, стр. 164) Пуансо говорит: „Действительно, чрезвычайно интересно, что совершенно неупругое тело только в силу своего движения может приобрести некоторое подобие упругости; при ударе о препятствие центр тяжести такого тела отражается в направлении, обратном первоначальному движению, или отбрасывается вперед с новою скоростью совершенно так же, как если бы оно пришло в соприкосновение с пружиной. Не меньше внимания заслуживает и то обстоятельство, что после отражения скорость не только может быть равна скорости центра тяжести до удара, как это бывает при вполне упругих телах, но даже может превзойти последнюю на любую величину, если только тело обладает достаточно большою скоростью вращения“.

² По замечанию Изенкраге („Rätsel der Schwerkraft“, стр. 108—115) и у самого Пуансо это положение не имеет общего значения. В отдельных случаях при ударе *вращающихся* неупругих тел происходит частичная или даже полная потеря поступательного движения. Когда же этого не бывает, то в целом вся энергия внешнего движения при столкновении все-таки уменьшается, так как вращательной энергии затрачивается больше, чем это необходимо для возмещения потраченной поступательной энергии.

240 ТЕОРИЯ ТЯГОТЕНИЯ ШРАММА

никакой иной силы, кроме инерции; благодаря повторным ударам множество атомов могло бы претерпеть такие изменения, что их поступательные и вращательные движения стали бы совершенно равными по величине и по направлению. *Такие сочетания атомов, в силу равенства своих движений, двигались бы как нечто единое и соответственно вели бы себя по отношению к остальным атомам.*

Более общий интерес, чем эти теории единой материи, стремившиеся построить на ее основе различные атомы, возбудили в новейшее время работы, которые, ближе примыкая к *кинетической теории газов*, допускают для атомов самостоятельное первичное существование, но только стараются объяснить силы, действующие между весомыми частицами, в духе Лесажа, движениями эфирных атомов. Мы уже упоминали, что в начале семидесятых годов У. Томсон вернулся целиком к идее Лесажа; около этого же времени Г. Шрамм¹ пытался обработать ту же теорию более детально и более глубоко с математической стороны. *Материю, вызывающую явления тяготения, Шрамм представлял себе в виде газа, понимаемого в духе механической теории теплоты.* Атомы этого мирового газа являются идеально упругими шарами, имеющими весьма незначительную, но различную величину, очень неплотно заполняющими пространство и движущимися, пока не встречают препятствий, прямолинейно и равномерно с очень большими скоростями. Состояния их движения в различных местах пространства, вообще говоря, различны, но чем больше рассматриваемые промежутки времени, тем больше они приближаются к некоторому постоянному среднему уровню. Если в этих атомных потоках движется *атом большей величины*, или *молекула*, то вследствие преобладающего влияния встречных движений, противоположных его движению, он должен постепенно (хотя, может быть, и по истечении бесконечно длинного промежутка времени) придти в состояние покоя. Если же в таких потоках окажется много больших атомов или молекул, то последние будут, наоборот, сближаться между собою. Представим себе, например, между обыкновенными движущимися атомами сначала только две молекулы, M и M_1 (см. прилагаемый черт. 8). Последние будут подвергаться ударам эфирных атомов со всех сторон, за исключением обращенных друг к другу внутренних сторон J и J_1 так как все атомы, движущиеся по направлению AA_1 и в противоположном направлении внутри конуса с угловым радиусом α , отражаются от внешних поверхностей молекул в окружающее пространство и, следовательно, не могут достичь внутренних поверхностей. Таким образом, часть поверхности J (и J_1) внутри конуса α_1 может воспринять только те атомы, которые отразились от обращенной к ней поверхности J_1 (соответственно J). Так как каждое отражение атома требует некоторого, хотя бы и весьма малого, времени τ , в течение которого атом должен потерять свою скорость в одном направлении и вновь приобрести ее в другом, то в случае, если бы нормально на прохожде-

¹ „Die allgemeine Bewegung der Materie als Grundursache der Erscheinungen“, Wien 1872; „Anziehungskraft als Wirkung der Bewegung“, Graz 1873. — Heinr. Schramm — директор средней школы в Австрии.

ТЕОРИЯ ТЯГОТЕНИЯ ШРАММА 241

ние промежутка от J до J_1 требовалось, в среднем, время t , то теперь это время увеличится до $t + \tau$. Следовательно, за то время, в течение которого на наружную поверхность A молекулы приходится m' атомов, на внутреннюю ее поверхность J попадает только

$$m' \frac{t}{t + \tau}$$

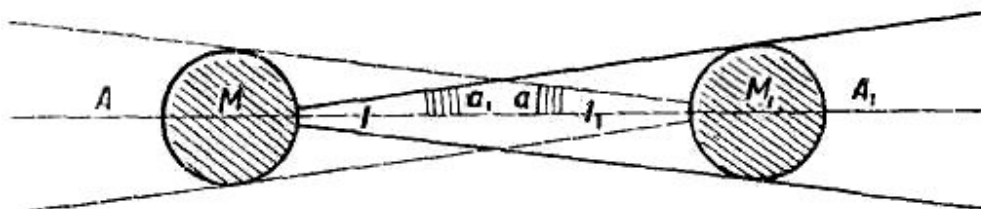
атомов, что дает для наружной стороны A излишек в

$$m' \frac{\tau}{t + \tau} = m'k$$

атомов, удары которых стремятся приблизить молекулу M к молекуле M_1 . Ускорение, получаемое тогда молекулой M по направлению к M_1 , равняется

$$\frac{\rho^2 \rho_1^2 \pi m' k c}{M x^2},$$

где x — расстояние между молекулами, ρ и ρ_1 — их радиусы, а c — скорость атомов. Таким образом, ускорение обратно пропорционально квадрату расстояния; а так как всякое тело, составленное из n молекул, будет производить на другое тело в n раз более сильное действие, то общее действие должно быть пропорционально и массе, при том, однако, предположении, что молекулы тела находятся друг от друга на столь большом расстоянии, что их действие можно действительно считать совершенно одинаковым. При выводе приведенной формулы приходится делать те же предположения, которые ввел в свою теорию уже Лесаж, а именно, что состояние эфира должно быть везде и все время одинаково, что атомы, вызывающие тяготение, обладают по сравнению с весомыми молекулами лишь весьма незначительной



Черт. 8.

массой и что сопротивление эфира движению молекул ничтожно. сверх того, наблюдаемое постоянство ускорения силы тяжести требует постоянства отношения ρ^2/M , т. е. требует, чтобы масса молекулы была пропорциональна не третьей, а второй степени его диаметра. Шрамм пытался поддержать такое само по себе маловероятное условие тем, что рекомендовал представлять себе молекулы в виде полых шаров с бесконечно тонкими стенками; при этом и идеальная упругость молекул становится более понятной, чем, если представлять их себе в виде массивных полых шаров.

242 РЕШЕНИЕ ЗАГАДКИ ТЯГОТЕНИЯ У ИЗЕНКРАГЕ

Однако Изенкраге¹ в своем сочинении «Das Rätsel der Schwerkraft» («Загадка тяготения») возражает как раз против *допущения абсолютной упругости атомов* с целью объяснения тяготения, так как, во-первых, это предположение опять-таки равносильно допущению *трансцендентного свойства* атома, что само по себе неприемлемо для механической теории материи, а во-вторых, оно совершенно *бесплодно и бесполезно* для той цели, для которой оно предназначено служить. Изенкраге считает возможным доказать, что при допущении абсолютно упругих атомов присутствие весомой молекулы в одинаковом во всех направлениях вихре эфирных атомов никоим образом не могло бы изменить состояния эфира, т. е. скорости его атомов и числа атомов, попадающих за определенное время на какую-нибудь поверхность. Отсюда он приходит к выводу, что и присутствие двух таких молекул не могло бы оказывать никакого влияния на эфир².

Поэтому в своем объяснении тяготения он совершенно отказывается от упругости атомов, но во всем остальном целиком сохраняет допущения Лесажа и Шрамма о дуализме материи, об ее атомном строении и о первичных движениях в эфире. «Представим себе, — говорит он, — что эфир вполне однородный газ, все составные части которого совершенно одинаковы; в таком случае массу какого-нибудь атома можно обозначить постоянной величиной μ . Кто не желает допускать такой однородности, пусть под величиной μ понимает среднюю массу атома эфира. Обозначим, далее, среднюю скорость через c ; а плотность, или, лучше сказать, частоту, с которой эфирные атомы пронизывают пространство, введем в расчет в виде числа эфирных атомов ν , пролетающих в единицу времени через одну квадратную единицу какой-нибудь неподвижной в пространстве плоскости. Поскольку нет особых оснований, говорящих против этого, мы допускаем, что эфирные атомы движутся в пространстве по всем направлениям с одинаковою скоростью и в одном и том же количестве. *Мы не ставим при этом во-*

¹ „Das Rätsel v. d. Schwerkraft. Kritik der bisherigen Lösungen des Gravitationsproblems und Versuch einer neuen, auf rein mechanischer Grundlage“, Braunschweig 1879. — С. Isenkrahe — преподаватель в Бонне.

² Эти положения, по-видимому, не вполне обоснованы. Во-первых, и при ударе упругих атомов для преобразования движений требуется все-таки известное время; поэтому эфирные атомы, попадающие на весомую молекулу, пристают к ней на некоторое время, вследствие чего, конечно, состояние эфира вблизи молекулы должно на известном протяжении измениться. Во-вторых, и приверженцы упругости атомов всегда исходили из положения равновесия одной молекулы в атомном вихре и утверждали только, что две молекулы служат друг для друга экраном и что только при наличии двух молекул в промежутке между ними уменьшается число действующих атомов. Сверх того, следует отличать упругость эфирных атомов от упругости весомых молекул. Приверженцы упругого удара допускали идеальную упругость эфирных атомов, главным образом, с той целью, чтобы при столкновениях их друг с другом не было никакой потери силы. Изенкраге же для взаимных столкновений молекул с атомами пользуется законами неупругого удара, чтобы по-своему объяснить происходящую при этом передачу силы. Но так как Изенкраге тоже не делает никаких определенных допущений о строении материи, а Шрамм, несмотря на совершенно упругий удар, все-таки допускает передачу силы, то результаты обеих этих теорий не настолько отличаются друг от друга, как этого можно было бы ожидать, принимая во внимание противоположность их основных предпосылок.

РЕШЕНИЕ ЗАГАДКИ ТЯГОТЕНИЯ У ИЗЕНКРАГЕ 243

проса, одинаковы ли или неодинаковы с эфирными атомами конечные частицы действующих на наши чувства тел, т. е. частицы так называемой «грубой материи». Мы допускаем лишь, что эти частицы, каким бы то ни было образом, по существу или же только формально, — отличаются от эфира. Там, где мы вводим в расчет действие эфира на составные части тел, мы последние называем «молекулами», обозначая их массу через m и скорость через v . Во всех случаях, когда заходит речь о форме атомов или молекул, мы ограничиваемся допущением для них шарообразной формы, так как все другие формы представляют для расчета большие трудности, преодоление которых не представляет пока интереса для нашей работы». После этих предпосылок Изенкраге обращается к исследованию действия эфирных потоков (в которых он на первое время допускает только поступательные движения) на находящуюся в покое молекулу. На единицу площади в секунду попадает $v/2$ атомов; следовательно, за время dt и на элемент поверхности df попадет $(v/2)dt df$ атомов. Эффект ударов на элемент поверхности (шарообразной молекулы) для различных атомов различен в зависимости от направления. Для эффекта центральных ударов всех попадающих атомов математические расчеты дают $\frac{1}{3}\mu v c df dt$ ¹. Тангенциальные удары должны попарно уравниваться уже на каждом элементе поверхности; но для целой шарообразной молекулы сумма эффектов всех центральных ударов тоже должна быть равна нулю, и молекула как была в покое, так и должна в нем остаться².

¹ Если бы все атомы попадали перпендикулярно на элемент поверхности то общий эффект ударов составил бы $\frac{1}{2}\mu v c df dt$; следовательно, отношение действий в обоих случаях равно 2:3. Как указывает Изенкраге, Шрамм ошибочно дал для этого отношения величину 1:2.

² Изенкраге присоединяет здесь очень важное замечание. Взаимное уничтожение всех эффектов центральных ударов, строго говоря, возможно только тогда, когда все удары происходят одновременно. Но так как такой случай исключительно редок, то в действительности молекула будет описывать некоторую зигзагообразную линию и колебаться во всевозможных плоскостях около некоторого среднего положения. „В качестве действия эфирных ударов для отдельной молекулы следует рассматривать не одни только эти (тепловые?) колебания, но также и внутренние движения, смещения отдельных частей молекулы. Представляя себе молекулы, т. е. ближайшие составные частицы доступной нашим чувствам материи, в виде агломератов, — как это делает химия, — мы должны допустить также изменчивость формы этих сочетаний. Для простоты рассмотрим поперечное сечение молекулы; здесь мы видим группу атомов молекулы, которые со всех сторон подвергаются ударам налетающих на них эфирных атомов... Для известного промежутка времени мы должны допустить, что давление, вызванное такими направленными со всех сторон ударами, для всех точек периферии одинаково и что, следовательно, эта периферия должна иметь форму круга. Другое дело, если мы будем рассматривать меньшие промежутки времени. Каждый отдельный налетающий атом эфира изменяет форму сечения, производя одностороннее давление; в зависимости от скорости, которою обладает атом, вызываемая им деформация будет больше или меньше. Но все эти изменения недолговременны, они быстро следуют друг за другом то там, то здесь, вследствие чего можно в известном смысле утверждать, что периферия поперечного сечения

244 КАЖУЩЕЕСЯ ПРИТЯЖЕНИЕ ДВУХ МОЛЕКУЛ

Но вслед за влиянием эфирного атома на покоящуюся молекулу следует, обратно, рассмотреть и влияние последней на первый. Так как эфирные атомы не упруги ¹ и ударяются они в неупругие тела, то скорость их при этом должна уменьшиться. Это уменьшение зависит от массы молекулы и может достигнуть $\frac{1}{3}$ скорости атома ². Таким образом вблизи молекулы скорость атома становится меньше, а вместе с тем и весь эффект удара, или давление эфира, становится слабее, чем в свободном эфире. *Это уменьшение эфирного давления вблизи молекулы вызывает кажущееся тяготение или притяжение по направлению к последней*, причем легко показать, что это уменьшение давления или кажущееся тяготение обратно пропорционально квадрату расстояний от молекулы. Можно было бы, пожалуй, возразить, что вследствие замедления движения эфирных атомов эфир должен был бы сгуститься вокруг молекулы и тем помешать кажущемуся притяжению; однако легко показать, что через какое-нибудь определенное поперечное сечение в пространстве атомы не могут проходить после сгущения в том же числе, как прежде, и что поэтому, несмотря на вышеупомянутое неоспоримое сгущение, действие ударов или давление эфира должно становиться слабее.

Так как, согласно принятому нами допущению, молекулы шарообразны, а движения эфира по всем направлениям одинаковы, то эфирное давление вокруг каждой молекулы должно быть распределено вполне равномерно; поэтому единичная молекула в движущемся эфире, несмотря на движение последнего, должна оставаться в покое ³. Если же около молекулы *a* находится другая *b*, то все атомы, идущие к *a* со стороны *b*, имеют меньшую скорость, чем все прочие атомы, попадающие на *a*; происходящее при этом нарушение равномерного

колеблется около круговой формы. Точно так же и в том случае, если бы, скажем, две молекулы налетели друг на друга под косым углом, они обе подверглись бы деформации, но эта последняя не могла бы долго удержаться, так как налетевшие со всех сторон с большою скоростью эфирные атомы быстро вновь восстановили бы колеблющуюся круговую форму. Возможно, что это происходит уже во время соприкосновения обеих молекул и что это оказывает значительное влияние на энергию взаимного отражения их друг от друга. В этом явлении можно усмотреть некоторый род упругости, который следует рассматривать только как феномен, а не как силу в обычном смысле этого слова; этот феномен может быть использован для объяснения множества действий, которые до сих пор приписывались непонятной силе упругости. Мне представляется возможным рассматривать упругость молекул (по крайней мере, до некоторой степени) именно таким образом, т. е. как результат всестороннего давления эфира".

¹ Если даже молекула кажется упругой, то все-таки части ее, воспринимающие удары, во всяком случае, неупруги.

² Средняя скорость, с которой атомы отскакивают от молекулы, равна

$$\frac{2}{3} c \cdot \frac{3\mu^2 + 3\mu m + m^2}{2\mu^2 + 3\mu m + m^2}$$

³ Только при допущении, что молекулы не имеют правильной сферической формы, может случиться, что эфир поблизости от молекулы, в зависимости от его формы, будет неодинаково сгущен. Этими неодинаковыми сгущениями эфира по различным направлениям, может быть, можно было бы объяснить некоторые явления молекулярной физики, которые до сих пор объясняли особыми молекулярными силами.

КАЖУЩЕЕСЯ ПРИТЯЖЕНИЕ ДВУХ МОЛЕКУЛ 245

распределения ударов действует как некоторая сила, стремящаяся сблизить обе молекулы. Изенкраге выводит для этой псевдопритягательной силы, действующей со стороны b на a , следующее выражение:

$$\frac{\rho^2 r^3}{E^2} \cdot \frac{\pi v}{3} dt f(\rho),$$

для силы, действующей со стороны a на b :

$$\frac{\rho^2 r^2}{E^2} \cdot \frac{\pi v}{3} dt f(r),$$

а для всего взаимодействия между обеими молекулами:

$$\frac{\rho^2 r^2}{E^2} \cdot \frac{\pi v}{3} dt [f(\rho) + f(r)],$$

где E обозначает расстояние между молекулами, r и ρ — радиусы молекул, а $f(r)$ и $f(\rho)$ — потери скорости¹, испытываемые атомами эфира при отражении от соответствующих молекул a и b . Применимость этого выражения ограничена теми случаями, когда расстояние между центрами молекул настолько велико по сравнению с их радиусами, что этим расстоянием можно везде заменить расстояние между поверхностями молекул. Там же, где вследствие незначительности расстояний такая замена невозможна, множитель E в знаменателе слишком велик. Следовательно, действие силы на молекулярных расстояниях больше, чем на конечных, откуда можно было бы вывести, что и молекулярные силы — прилипание, сцепление и химическое сродство — должны действовать сильнее тяготения². Для перехода от притяжения между молекулами к притяжению между телами и к объяснению понятия о массе Изенкраге представляет себе две пластинки, из которых каждая состоит из одного только слоя молекул; эти пластинки расположены таким образом, что обе они перпендикулярны к соединяющей их линии. При этом действие каждой молекулы независимо от действия прочих молекул, а также совокупное их действие может быть легко получено путем суммирования известных действий отдельных молекул. Однако из характера образования этой суммы следует, что действие одного слоя на другой противолежащий можно удвоить двумя способами: либо поместив около этого слоя второй слой, совершенно одинаковый с первым, или же вставив в промежутки между молекулами первого слоя еще такое же количество молекул. Отсюда следует, что взаимодействие двух молекулярных слоев пропорционально как их объемам, так и их плотностям или что оно пропорционально их массам, если произведение плотности на объем заменить несколько сомнительным понятием массы³.

¹ Эти потери в скорости зависят от масс молекул, а, следовательно, от их радиусов r и ρ и потому являются функциями этих последних.

² На это обстоятельство указывал уже Шрамм.

³ Интересно, что Изенкраге, совершенно, так же как и Шрамм, вынужден допустить постоянство отношения $r^2 f(r)/M$ — для того, чтобы из его расчетов

246 ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ТЕЛ

После этого Изенкраге оставалось разрешить еще последнюю, но и наиболее трудную задачу, а именно — вывести выражение для *притяжения системы молекул, состоящей из многих расположенных друг за другом слоев*, т. е. для *физического тела*. Для этой цели он предполагает, что позади молекулярного слоя A_1 поставлен параллельно другой равный ему слой A_2 на таком расстоянии A_1A_2 , что последним можно пренебречь по сравнению с расстоянием A_1B между слоями A_1 и B . Тогда в первом приближении можно было бы действия каждого из слоев A_1 и A_2 на слой B считать одинаковыми, а совокупное их действие считать вдвое большим действия каждого из них в отдельности. Но, конечно, это было бы только очень грубым приближением. В самом деле, так как от первого слоя A отразилось некоторое количество, положим Δv , эфирных атомов, то до второго слоя A дойдет уже $v - \Delta v$ атомов, из которых, в соответствии с отношением при первом отражении, может отразиться только $\Delta v(1 - \Delta v/v)$ атомов.

А так как, при прочих равных условиях, притягательные действия слоев зависят только от числа отражающихся атомов, то действия слоев A и A_1 должны быть пропорциональны выражениям 1 и $1 - \Delta v/v$. Отсюда для действия значительного числа последовательно друг за другом расположенных слоев легко получить следующие отношения:

$$1 : \left(1 - \frac{\Delta v}{v}\right) : \left(1 - \frac{\Delta v}{v}\right)^2 : \left(1 - \frac{\Delta v}{v}\right)^3 : \dots$$

Но это приводит к едва ли приемлемому положению, что различные слои тела тяготеют не одинаково и что, следовательно, вес тела не может быть пропорциональным его массе. Правда, на это можно было бы, опираясь на некоторые физические соображения, возразить, что расстояния между молекулами тела огромны по сравнению с размерами самих молекул и что, следовательно, дробь $\Delta v/v$, обуславливающая уменьшение тяготения, чрезвычайно мала. Однако эта дробь все же должна иметь некоторую определенную величину, так как в противном случае не было бы вообще и тяготения. Поэтому Изенкраге пытается с помощью *второго приближения* еще сильнее уменьшить найденное понижение тяготения с увеличением толщины тела. С этой целью он утверждает, что атомы, отражающиеся от первого слоя A или, вернее, соскальзывающие с него¹, не вполне еще бывают потеряны

получилось постоянство ускорения силы тяжести. Однако с этой целью Изенкраге допускает не пропорциональность между массой и поверхностью, как Шрамм, а *равенство величин всех последних составных частиц материи*. Он высказывает предположение, что и весомая материя, в конечном счете, может быть, состоит из эфирных атомов, и в подкрепление этого мнения приводит убеждение многих выдающихся химиков в существовании первичной материи.

¹ Угол отражения в данном случае, действительно, является очень тупым: величина его заключается между 132 и 161° .

СРАВНЕНИЕ СТАРЫХ И НОВЫХ ВОЗЗРЕНИЙ 247

для остальных слоев A ; они попадают еще на эти слои, но только с уменьшенной скоростью. Если через Δc обозначить потерю в скорости, которую испытывают атомы при отражении от первого слоя, мы с помощью простых математических выкладок получим совершенно так же, как и прежде, следующие соотношения между притяжениями расположенных друг за другом слоев:

$$1 : \left(1 - \frac{\Delta v}{v} \cdot \frac{\Delta c}{c}\right) : \left(1 - \frac{\Delta v}{v} \cdot \frac{\Delta c}{c}\right)^2 : \left(1 - \frac{\Delta v}{v} \cdot \frac{\Delta c}{c}\right)^3 : \dots$$

Так как Δc опять-таки можно принять весьма малым по сравнению с c , то при этом *третьем приближении* убыль тяготения еще больше уменьшается, а так как атом не только просто движется вперед, но при наличии многих слоев может быть отражен и обратно, то в результате таких повторных отражений его скорость может быть использована в большей степени и уменьшение притягательного действия слоев может быть сведено к совершенно незаметной величине. *Тем не менее, такое теоретическое уменьшение все-таки остается, а вместе с тем остается в силе и противоречие этой теории общепринятому допущению об абсолютной пропорциональности между массой тела и силой тяжести.* Непосредственно нельзя решить, которое из этих допущений правильно, так как до настоящего времени мы имеем возможность измерять массу только при помощи ее веса. Для разрешения этого вопроса косвенным путем Изенкраге указывает, что согласно его теории тяжесть должна зависеть от расстояния между молекулами, а, следовательно, и от температуры, что при старом воззрении на тяжесть как на первичную силу представляется невозможным. Но так как и по новой теории, тяжесть может лишь очень незначительно изменяться с температурой, то, значит, не приходится ожидать скорого разрешения данного вопроса и этим путем ¹.

Существуют, однако, и другие различия в действии тяжести в зависимости от того, рассматривать ли ее с точки зрения новой или старой теории; с помощью таких различий, может быть, удалось бы скорее разрешить данный вопрос. Согласно ньютоновскому воззрению (равно как и согласно галилеевским законам падения тел) тяготение совершенно не *зависит* от *состояния движения весомых масс*, между тем как согласно кинетическим воззрениям тяготение должно уменьшаться по мере увеличения скорости весомых тел, и притом таким образом, что при равенстве скоростей весомых масс и эфирных атомов тяготение должно стать равным нулю. Шрамм в упомянутых своих работах вполне правдоподобно определил *скорость эфирных атомов* и, таким образом, дал средство для того, чтобы определить уменьшение тяготения под влиянием движения весомых масс. Именно, он нашел, что согласно предпосылкам кинетической теории газов скорость распространения в газах волнообразного движения должна от-

¹ Вопрос о связи между тяжестью и температурой много раз уже подвергался исследованию; последний раз его исследовал Секки в своем сочинении „Единство сил природы“.

248 СТАРАЯ И НОВАЯ ТЕОРИЯ ТЯГОТЕНИЯ

носиться к скорости поступательного движения газовых молекул, как 2:3. В соответствии с этим можно из наблюдаемой скорости распространения звука в воздухе в 332 м получить для скорости поступательного движения молекул воздуха 498 м, т. е. число, лишь немногим отличающееся от вычисленного Клаузиусом числа 485 м. Если этот метод применить и к эфиру, рассматривая его как газообразную материю, мы из скорости распространения света в 42 000 миль получим для скорости поступательного движения эфирного атома 63 000 миль в секунду. Такова, следовательно, должна бы быть скорость весоных масс для того, чтобы эфирные потоки не производили на них никакого действия, вызывающего тяготение. *Близость же этого числа к веберовской постоянной $c=59\,320$, т. е. к скорости, при которой взаимодействие двух движущихся электрических частиц согласно закону Вебера должно быть равно нулю, дает серьезное основание для отождествления тяготения с электрическим притяжением, или, еще больше, для того, чтобы и то и другое свести к одному и тому же источнику — к ударам движущихся атомов эфира.* Тогда согласно закону Вебера следовало бы и тяготение вычислить по формуле:

$$\frac{mm_1}{r^2} \left[1 - \frac{1}{c^2} \left(v^2 - 2r \frac{dv}{dt} \right) \right],$$

но в этом случае все изменения тяготения, происходящие под влиянием скорости весоных масс, оказались бы совершенно вне пределов наблюдения вследствие большого значения постоянной c и сравнительной незначительности всех скоростей весоных тел. Но зато эти соображения подают еще другую надежду разрешить опытным путем указанное разногласие между обеими теориями. *Если тяготение является непосредственным действием на расстоянии, то оно должно распространяться в пространстве мгновенно; если же оно есть действие эфирных ударов, то оно может распространяться от одной точки пространства к другой максимально со скоростью эфирных атомов.* При огромности поля наблюдения, представляемого нам вселенной, время распространения тяготения должно было бы быть столь же легко наблюдаемой величиной, как время распространения света; к сожалению, в действии тяготения нельзя наблюдать таких перерывов во время его распространения, какие наблюдаются у света, а можно наблюдать лишь минимальные изменения его интенсивности. Такие изменения силы тяжести на земле вызываются *периодическими изменениями положения солнца и луны.* Согласно воззрению Ньютона вес тела (определенный с помощью пружинных весов) должен достигать своего минимума ровно в полдень и своего максимума ровно в полночь; согласно же *кинетическому* воззрению наступление этих моментов должно несколько *запаздывать.* Точно так же и периодическое изменение положения луны должно вызывать подобные же периодические изменения в показаниях очень чувствительных уровней и маятников. Однако до сих пор еще не удалось путем измерения ни констатировать какое-либо изменение в силе тяжести, ни выяснить, происходят ли эти изменения одновременно с их космическими причинами или же они не-

СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЯГОТЕНИЯ 249

сколько запаздывают. Целльнер полагал, что вопрос о времени распространения тяготения можно фактически разрешить с помощью *горизонтального маятника*. Устроенный им прибор¹ состоял из горизонтального стержня, подвешенного на нити таким образом, что единственная точка подвеса находилась очень близко к одному из концов стержня. На более длинном плече стержня висел довольно тяжелый груз, а более короткое для равновесия поддерживалось нитью, которая была направлена вниз и там закреплена. Путем сближения точек прикрепления обеих нитей можно было бы по желанию уменьшить направляющий момент стержня и тем повысить чувствительность маятника, но зато, конечно, тем резче проявились бы случайные колебания маятника, вызываемые движениями в окружающей среде. Относительно подтверждения возможной *скорости распространения тяготения* Целльнер в конце вышеупомянутых работ говорит следующее: «Маятник, двигаясь только под влиянием одного солнца, должен был бы, при описанной установке его в меридиане, переходить в продолжение 24 час. четыре раза через свое положение равновесия (в плоскости меридиана), а именно — при восходе и закате солнца и при верхнем и нижнем его прохождении через меридиан. Так как эти движения маятника не представляют собою суммированных действий, подобно действию моря при приливе и отливе, а вызываются непосредственно действием притяжения на расстоянии, то они должны были бы наступать одновременно с соответствующими положениями солнца. Если же,

¹ „Pogg. Ann.“, CL, стр. 131 и 134, 1873. Целльнер только во время печатания своего сочинения узнал, что уже в 1862 г. („Comptes rendus“, LIV, стр. 728; „Pogg. Ann.“, CXVI, стр. 511) Перро описал подобный *горизонтальный маятник*. А после выхода в свет этой работы было отмечено, что Лоренц Генглер еще в 1832 г. („Dingl. Journ.“, XLIII, стр. 81) устроил такой же горизонтальный маятник и по поводу его применения сообщил следующее: „В мартовское новолуние я установил весы таким образом, что в полдень плечо рычага находилось на полуденной линии. И вот после этого оно стало проделывать следующие колебания: начиная с двенадцати часов рычаг отклонялся все к западу, и так продолжалось до трех часов; затем он постепенно возвращался назад и примерно после шести часов был снова на полуденной линии; после этого он отклонялся далее к востоку и т. д. Когда я сравнил пределы этих колебаний в различные дни, то оказалось, что отклонения были наибольшими во время новолуния и полнолуния и наименьшими во время квадратур“. О совершенно забытом Геншере проф. Цех сообщил („Pogg. Ann.“, CL, стр. 496), что он родился 3 февраля 1806 г. в Рейхенгофене и при поддержке благотворителей сначала готовился к изучению богословских наук, а потом изучал в Мюнхене математику и астрономию. После двухлетних занятий, вследствие недостатка средств, он вернулся в Штутгарт для изучения шлифования стекол у одного оптика, но потом вернулся к богословской карьере и был впоследствии пастором в различных местах. Будучи пастором в Мюнцингере, он умер в 1858 г. от болезни дыхательных путей, причем в последнее время он был еще занят устройством огромного телескопа.— О применении пружинных весов для определения вариаций силы тяжести Перро в вышеупомянутом сочинении говорит: „Если к длинной винтообразной пружине подвесить чашку и положить на нее груз, то тотчас же происходит два эффекта: понижение чашки и ее вращение. Если затем пренебречь понижением, то, полагаю, из моих опытов можно вывести заключение, что при помощи пружины в несколько метров длиною и очень малого диаметра можно констатировать изменение силы тяжести в 0,01 мм, т. е. действие, в десять раз меньшее максимального действия луны“.

250 ВОЗРАЖЕНИЯ ПРОТИВ ТЕОРИИ ИЗЕНКРАГЕ

напротив, для силы тяготения требуется, подобно свету, около восьми минут для того, чтобы дойти от солнца до земли, то наступление вышеупомянутых положений равновесия маятника должно было бы запаздывать на такое именно время. Поэтому, если бы удалось определить моменты перехода его через положения равновесия с точностью до одной минуты, то вопрос о том, необходимо ли время для распространения тяготения, мог бы быть решен даже и в том случае, если бы скорость распространения тяготения в восемь раз превышала скорость света». Однако, насколько нам известно, до сих пор еще не было сделано попытки провести эти решающие опыта. Изенкраге заканчивает свое исследование о загадке тяготения следующими строками: «По моему мнению, один только целльнеровский опыт является действительно решающим. В самом деле, если тяготение не требует заметного времени для распространения своего действия от солнца до земли, то для защитников эфирно-ударной теории не оставалось бы ничего другого, как сказать: скорость эфирного атома настолько велика, что радиус земной орбиты представляется по сравнению с нею ничтожно малой величиной, т. е. высказать такое утверждение, которое большинство физиков заставило бы сомнительно покачать головой. Мне представляется, однако, весьма вероятным, что тяготению предстоит та же судьба, что и свету... Распространение тяготения продолжает считаться мгновенным — на двести лет дольше, чем это принималось для света; не должен ли и для тяготения найтись свой Олаф Ремер, который и для него исчислит число миль в секунду? Но пока это случится, наша теория, разумеется, будет оставаться только гипотезой, и должна будет вести борьбу за существование с другими ей подобными».

Работа Изенкраге над разрешением тайны тяготения является значительным научным вкладом, главная цель которого заключается в осторожной и объективной разработке этой проблемы. В то время как большинство противников тяготения как первичной силы распыляло свои силы по отдельным работам, стремясь подобно агитаторам и пророкам больше утверждать, чем доказывать, Изенкраге шел более медленным и более нормальным путем, он изучал, проверял и сравнивал своих предшественников, брал у них то, что представлялось достаточно надежным, стараясь всегда строго отмечать все гипотетическое. Благодаря этому, с одной стороны, он достиг того, что его работа была замечена и оценена физиками в большей мере, чем многие прежние работы того же рода, а с другой стороны, — его исследованиями было положено более надежное основание для последующих работ и, в пределах осуществимого, была устранена возможность дальнейших нелепых и несостоятельных гипотез. Сам Изенкраге, впрочем, сознавал, что и его разработка не устранила еще всех трудностей вопроса; к сожалению, нельзя не признать, что как раз эти оставшиеся неразрешенными трудности имеют основное значение для разрешения данного вопроса.

Если оставить в стороне теории эфирного давления в собственном смысле, мы имеем двоякого рода кинетические теории тяготения — *волнообразные* и *ударные*, и следует признать, что обе они в состоя-

ВОЗРАЖЕНИЯ ПРОТИВ ТЕОРИИ ИЗЕНКРАГЕ 251

нии вывести тяготение из движения. *Волнообразные теории* имеют при этом большое преимущество в том отношении, что для них в световом и тепловом эфире уже обеспечена колеблющаяся среда и что кажущиеся притяжения и отталкивания, вызываемые волнообразными колебаниями упругих сред, уже доказаны опытным путем. Однако эти преимущества уравниваются трудностью объяснения происхождения и сохранения, вызывающих тяготение колебаний без допущения первичных сил притяжения и отталкивания, а также трудностью математически обосновать переход колебаний с эфира на весомую материю и превращение колебаний в поступательное движение. С другой стороны, — *ударные теории* могут опираться на кинетическую теорию газов лишь при том условии, если для эфира допустить такое же молекулярное строение, как и для газов. Но зато здесь сохранение движущих сил становится, по-видимому, вполне ясным, а превращение движений полностью определяется математическими законами упругого или неупругого удара. *Простота постулатов, наглядность выводов и большая легкость проверки результатов присущи, во всяком случае, в большей мере ударным теориям, чем волнообразным*, вследствие чего мнение физиков в последнее время склоняется больше в пользу первых, чем последних. *Затруднения, препятствующие еще всеобщему принятию ударной теории тяготения, заключаются не столько в даваемом ею объяснении действия сил, сколько в положенных в ее основу атомистических и дуалистических воззрениях на материю.* Изенкраге считает понятия «упругое» и «составленное из частиц» неотделимыми друг от друга и поэтому считает последние элементарные частицы материи, т. е. атомы, совершенно неупругими. А так как в элементарных атомах невозможно превращение внешних движений во внутренние, то происходящая при ударе неупругих атомов потеря силы должна быть абсолютной, вследствие чего закон сохранения энергии должен оказаться неприменимым, во всяком случае, к миру атомов ¹ (для молекул Изенкраге допускает производную упругость, обусловливаемую сложностью их структуры). *Фактически Изенкраге в угоду своей теории ограничивает действие закона сохранения энергии одной только видимой и осязаемой материей, утверждая, что по отношению к массам, лежащим вне сферы наших чувств, т. е. по отношению к атомам, этот закон не доказан и, может быть, неприменим.* Но так как атомы эфира находятся в постоянном взаимодействии с весомыми молекулами, потеря энергии в атомах должна повлечь за собою и потерю энергии в молекулах; поэтому Изенкраге вынужден считать закон сохранения энергии только приблизительно верным и для ося-

¹ „Das Rätsel von der Schwerkraft“, стр. 130: «Закон сохранения энергии представляет собой столь импонирующее достижение нашего столетия в области естественных наук, что весьма понятно, если из уважения к нему прибегают к всевозможным ухищрениям, дабы согласовать с ним абсолютную твердость и неизменяемость эфирных атомов. С одной стороны, перед нами стоит логическое требование не допускать наличия в атомах перемещающихся частей, а с другой — закон сохранения живой силы; тот, кто желает полностью удовлетворить и тому и другому требованиям, оставаясь в то же время на почве основной гипотезы Гюйгенса, находится, по моему мнению, перед неразрешимой задачей».

252 АТОМИСТИКА ЛАССВИЦА

заемой материи, допуская, что окончательные потери энергии исчезающе малы по сравнению с бесконечно большим запасом всей энергии ¹. Но тем самым закон сохранения энергии был принципиально сведен на нет, и Изенкраге со своей теорией вступил в противоречие с этим законом, как своим допущением неупругих атомов он вступил в противоречие с кинетической теорией газов, на почве которой стали расцветать эфирно-ударные теории тяготения. *Оба эти обстоятельства составляют очень серьезный довод против теории Изенкраге и заставляют задуматься, не лучше ли будет все-таки допустить упругость атома и представить себе переход сил с атома на молекулу в духе теорий Лесажа и Шрамма.*

Действительно, многие физики пытались обеспечить применимость закона сохранения энергии и к атомам, приписывая им, несмотря на их элементарность, упругие свойства. При этом указывалось, что, конечно, когда передача движений происходит при посредстве минимальных частиц материи, движение может полностью или частично передаваться и этим частицам, в соответствии с чем и удар может оказаться совершенно или частично неупругим, но что при столкновении простых тел превращение внешнего движения во внутреннее совершенно невозможно и, следовательно, в этом случае удар должен всегда происходить без потери живой силы, т. е. он должен быть упругим. Но если допустить, что в атомах невозможно внутреннее движение, то это значило бы, что атомы абсолютно тверды, и тогда передача движения опять становится непонятной, так как она должна была бы происходить в одной точке и мгновенно, т. е. вне пространства и времени. Эти последние затруднения пытается обойти К. Лассвиц в своем сочинении «Atomistik und Kriticismus» («Атомистика и критицизм» ²), где он выводит законы удара не на основе наглядного построения материи, а в духе критической философии — из теоретико-познавательных основных условий нашего представления о движении. *Лассвиц рассматривает, таким образом, проблему удара с более общей точки зрения, — как проблему передачи или преобразования движений.* Для всех подобных передач он выводит из закона инерции по существу тождественное с последним положение: «Движение может быть уничтожено только равным и противоположным ему движением». Для суждения о равенстве движений необходима мера. Подобными мерами движения являются либо количество движения mv , либо живая сила $\frac{1}{2} mv^2$, в зависимости от того, сравнивают ли дви-

¹ „Das Rätsel von der Schwerkraft“, стр. 152: „Если представить себе известные огромные расстояния между телами нашей солнечной системы и те невообразимо большие пространства, которые отделяют друг от друга неподвижные звезды до отдаленнейших туманных пятен, и подумать, как ничтожно малы по сравнению с ними пространства, реально заполненные непроницаемой материей, то, я думаю, легко придти к выводу, что вся сумма живой силы, которой обладают летающие по этой безграничной арене эфирные атомы, может уменьшиться только на бесконечно малую долю от ударов, происходящих в течение конечного промежутка времени“.

² „Atomistik und Kriticismus. Ein Beitrag zur erkenntnisstheoretischen Grundlegung der Physik“, Braunschweig 1878. — Kurt Lasswitz — преподаватель гимназии в Готе, автор известной „Истории атомистики“.

нения для *равных промежутков времени* или для *равных отрезков пути*. Если, согласно закону инерции, придерживаться постоянства количества движений при всех их преобразованиях, то для всех превращений движения, а вместе с тем и для всех столкновений материальных частиц должны иметь силу оба закона; при всех непосредственных передачах движений сумма количеств движения остается неизменной и при всех непосредственных передачах движений энергия движений есть величина постоянная ¹. *Оба эти положения характеризуют все происходящие в природе столкновения материальных частей как упругие. Только в телах, составленных из частей, удар может принять видимость неупругого вследствие того, что часть внешнего движения тел преобразуется во внутреннее движение их частей и, таким образом, представляется как бы исчезнувшей.* Там же, где внутреннее движение частиц невозможно, как, например, в неделимых твердых атомах, невозможно и преобразование вида энергии, а вместе с тем невозможна и какая-либо видимая потеря последней. Если, таким образом, мы допустим абсолютную твердость атомов, то тем самым упругий характер их удара получается сам собою ².

С такими заключениями нельзя не согласиться, поскольку для абсолютно неделимых твердых атомов неупругий удар представляется совершенно невозможным. *Но, с другой стороны, и в изложении Лассвица понятие о неделимых твердых атомах и возможность передачи силы между такими атомами остаются столь же необъяснимыми, как и раньше.* В самом деле, если допустить, что атом еще занимает некоторый объем, то необходимо допустить, что он еще состоит из частей, а тогда нельзя себе представить, чтобы эти части были абсолютно неподвижными, неспособными смещаться. Если атом состоит еще из материи, то он еще имеет сложный состав и части его должны быть подвижны. Понятие о протяжении уже содержит в себе понятие о делимости, абсолютно неделимый твердый атом не должен был бы иметь объема, он должен был бы быть точкой; но в таком случае не достигается цель получения абсолютно твердых атомов; так как допущением твердых атомов как раз стремились обойти нематериальные точечные атомы, которые были предложены Фехнером и другими. *Строго говоря, понятие атома лежит за пределами нашей познавательной способности в такой же мере, как и понятие конечной причины.* Предельных простых частиц материи мы в нашем познании никогда не можем установить, так как если мы исходим из материи, то каждая ее частица всегда остается все-таки материей и, следовательно, опять-таки делима; если же мы непосредственно исходим из элементарных частиц, то последние приходится представлять себе непротяженными, т. е. точками, а из таких непротяженных точек мы никаким синтезом не получим материи. Последняя частица материи никогда не может быть обнаружена в каком-либо явлении, она

¹ „Atomistik und Kriticismus“, стр. 69—95.

² „Atomistik und Kriticismus“, стр. 96—104. К совершенно таким же результатам, как Лассвиц, пришли Ф. и Н. Мазон в 1883 г. („Beiblätt. zu Wied. Ann.“, VII, стр. 338, 1883. Извлечение авторов из „Известий“ университета св. Владимира в Киеве, январь 1883).

254 ОТНОСИТЕЛЬНАЯ НЕДЕЛИМОСТЬ АТОМОВ

принадлежит к числу идеальных объектов (Gedankending), к разряду «ноуменов» по терминологии Канта; утверждая, что она реальна, атомистика впадает в те же самые противоречия, какие были свойственны: до-критической метафизике.

Между тем для физики вовсе нет никакой необходимости в том, чтобы воспринимать атом в этом метафизическом смысле. *Совершенно достаточно определить атомы как частицы материи, которые для настоящего состояния наших знаний представляются абсолютно простыми, т. е. не состоящими из материальных частей, даже с точки зрения тех свойств, на основании которых мы судим о различных внутренних частичных движениях.* Согласно этому относительному понятию о предельных частицах или атомах, которое уже совершенно усвоила химическая атомистика, атомы могли бы, конечно, быть как упругими, так и неупругими. Но так как мы только что указали на невозможность проявления в атомах каких-либо внутренних движений, мы тем самым уже допустили, что атомы упруги или, по крайней мере, что отклонения их от совершенной упругости должны быть для нас незаметны. Но если бы, напротив, было вполне определенно доказано существование в атомах неупругих свойств, то согласно вышеизложенному воззрению пришлось бы перенести понятие об атомах с этих частиц материи на дальнейшие дробные их подразделения¹.

Таким образом, атом остается для нас предельной частицей материи лишь постольку, поскольку мы не в состоянии признать в нем неоднородности или различия частей. Но тут возникает вопрос, особенно трудный для данного воззрения, в чем же собственно кроется причина существования предельных частичек и какова сила, обуславливающая возникновение этих предельных частиц в материи. Мы не можем уже более допустить существования первичной силы, связывающей между собою частицы, мы отказались также и от возможности построения материи из первично заданных вместе с нею неделимых частиц; *следовательно, для образования предельных материальных частичек остается*

¹ При таком определении атома должен придти к концу и старый спор о непрерывном или прерывном заполнении пространства материей, ибо если отрицается существование минимальных частиц в материи, то, по крайней мере, в идеале отпадает и всякая прерывность последней. В соответствии с этим Краузе („Das nachgelassene Werk Immanuel Kant's", Frankfurt a. M. und Lahr 1888) из кантовской философии, защищающей самым строгим образом непрерывность материи, делает тот вывод, „*что атомистика представляет собою вполне законную форму исследования материи, если только пространству или материи не приписывают извечно мозаичного деления на части, а под атомом понимают каждую произвольно малую частицу материи, соединенную в единое целое*" (стр. 176). Данная Краузе трактовка посмертной работы Канта еще в том отношении совпадает с новыми теориями материи, а также с данной нами раньше характеристикой названной работы (см. вып. I этой части, стр. 49 и сл.), что согласно ей материя может быть постигнута только как нечто движущееся в пространстве и, следовательно, все явления природы должны сводиться к движениям материи. Но когда затем Краузе считает необходимым для объяснения первичных противоположных движений материи допустить в последнем счете существование в ней отталкивательных и притягательных сил, выводя их из кантовской работы, то физик, даже если он является приверженцем кантовской философии, вероятно, останется по этому поводу при особом мнении.

ВИХРЕВЫЕ ДВИЖЕНИЯ. ГЕЛЬМГОЛЬЦ 255

опять-таки та единственная причина, которую кинетическая физика считает первичной действующей в мире причиной, а именно — движение. Действительно, уже со времен Декарта на инерцию частиц указывали как на единственную причину сцепления твердых тел и неоднократно указывали на то обстоятельство, что при быстрых общих движениях, например в водяных струях, происходят явления прочного сцепления. Собственно говоря, кинетические теории соединения материи в отдельные тела и вызвали оживление кинетической физики. Выше мы уже рассказали о деллингсгаузеновском объяснении образования тел стоячими волнами в его колеблющейся материи, однако определение причин указанных выше дифференциаций в совершенно однородной среде составляет для него едва ли разрешимую задачу. Секки стремился вывести чисто кинетически хотя бы системы, составленные из атомов, утверждая, что два вращающихся атома, столкнувшись друг с другом в направлении своих осей вращения, не могут уже более отделиться и должны впредь двигаться совместно; но и при этом допущении все-таки трудно составить себе представление, как о возможном различии, так и о возможном тождестве тел. Скорее такое представление можно было бы составить на основе теории У. Томсона, так как *последняя допускает существование большого количества первично присущих материи различий в движениях*. К сожалению, однако, эта теория так сложна в своих допущениях и требует таких искусственных механических построений, что ее трудно принять за нечто большее, чем за пояснительный пример. В 1858 г. Гельмгольц опубликовал статью «Über Integrale der hydrodynamischen Gleichungen, welche den Wirbelbewegungen entsprechen» («Об интегралах гидродинамических уравнений, соответствующим вихревым движениям») ¹, в которой он показал, что в жидкости, части которой движутся без всякого трения: 1) ни одна частица не приходит во вращательное движение, если она не имела его с самого начала; 2) что частицы жидкости, которые в какой-либо момент времени принадлежат к одной и той вихревой линии ², остаются навсегда на этой линии, 3) что произведение поперечного сечения на скорость вращения какой-либо бесконечно тонкой вихревой нити ³ имеет вдоль всей нити постоянную величину, сохраняя ее и при перемещении нити, вследствие чего вихревые нити внутри жидкости должны замыкаться, или же еще могут заканчиваться на границах жидкости. Этими положениями, а также некоторыми дальнейшими выводами, сделанными из них Гельм-

¹ „Journ. für reine u. angew. Mathematik“, LV, стр. 25, 1858; также „Wissenschaftl. Abhandl.“, I, стр. 101.

² „Вихревыми линиями я называю линии, проведенные в массе жидкости таким образом, что их направление повсюду совпадает с направлением мгновенной оси вращения расположенных на ней частиц жидкости“ („Wissenschaftl. Abhandl.“, I, стр. 102).

³ „Вихревыми нитями я называю части массы жидкости, выделенные из последней вихревыми линиями, проведенными через все точки периметра какого-нибудь бесконечно малого элемента поверхности“ („Wissenschaftl. Abhandl.“, I, стр. 102).

256 ВИХРЕВАЯ ТЕОРИЯ АТОМОВ У. ТОМСОНА

гольцем, воспользовался в 1867 г.¹ У. Томсон для попытки *чисто кинетического объяснения неделимого, но все-таки протяженного атома*. Если представить себе вселенную совершенно заполненной какой-нибудь идеальной жидкостью (т. е. жидкостью без всякого внутреннего трения), то согласно положениям Гельмгольца в ней без особого творческого акта не может возникнуть ни одного нового вихревого кольца, а уже существующие в ней кольца без такого же творческого акта не могут быть уничтожены. Таким образом, имеющиеся в жидкости вихревые кольца в силу естественного порядка вещей неделимы и неразрушимы, они сохраняют определенную форму и проявляют известную упругость — в том смысле, что после столкновения двух таких вихревых колец каждое из них колеблется около положения своего равновесия до тех пор, пока полностью не вернется к нему. Вихревые кольца могут иметь различную величину и различную форму; они могут представлять собою просто замкнутые линии или же линии, многократно завитые и переплетенные. Вихревые кольца действуют друг на друга при посредстве среды, в которой они движутся, даже на расстоянии, то сближаясь между собою, то удаляясь друг от друга, Как если бы между ними действовали притягательные и отталкивательные силы. Коротко говоря, эти вихревые кольца обнаруживают все те свойства, которые предполагаются в материальных атомах, поэтому нет никаких препятствий к тому, чтобы представить себе материю состоящей из таких вихревых атомов.

Мы оставим открытым вопрос о том, признает ли Томсон реальное существование вихревых атомов. Но, *во всяком случае, на этом примере он показал, как можно объяснить индивидуализацию в материи, не прибегая к особым силам, а только при помощи особых движений*. Вместе с тем кинетический способ объяснения явлений получил здесь известную завершенность. Этим было доказано, что определению материи как чего-то движущегося в пространстве принципиально ничто не противоречит и что для объяснения сил материи, по-видимому, достаточно одних внутренних движений в последней². Тем не менее, это

¹ „Edinburgh Trans.“, XXV, стр. 217, 1869; «On vortex motion» (доложено 21 апреля 1867 г.).

² Против кинетики как всеобъемлющего физического метода с чисто принципиальной точки зрения выступил в новейшее время Гирн, известный теоретик в области теплоты, в упомянутой уже выше работе („La notion de force dans la science moderne“, „Revue Scientifique“ (3), XXXVI, стр. 129, 1885). Гирн полагает, что без наличия в материи элементарных сил нельзя объяснить *передачи движения* даже при простом ударе и что при ударе атомов следует допустить наличие деформации, благодаря которой возникает напряжение, сообщающее неподвижному атому то движение, которое оно отняло у другого атома. Он придерживается того мнения (которое высказывалось уже и раньше), что движение никогда не может непосредственно перейти в другое движение и что для этого необходим некоторый отличный от материи посредствующий элемент — сила, которая проявляется тройко; как сила тяжести, электрическая и тепловая сила. Однако приведенная только что характеристика атомов показывает, что нет никаких препятствий к тому, чтобы считать их способными и к деформации; кроме того, У. Томсон показал, что и упругие силы также можно вывести из движений и что, следовательно, нет необходимости рассматривать их как первичные свойства материи („Nature“, XXX, стр. 417, 1884). Во всяком случае, и с естественнонауч-

МОЛЕКУЛЯРНАЯ МЕХАНИКА 257

может быть только началом собственно кинетической физики, так как для нее важна не столько вообще возможность объяснений, сколько конкретное объяснение отдельных вопросов и сведение каждого отдельного физического случая действия силы к особому роду внутреннего движения, лежащего в его основании. Однако в отдельных областях физики и, особенно в учении об электричестве эта работа оказалась еще труднее, чем в области тяготения, чему прямо и следует приписать то обстоятельство, что в новейшее время гораздо меньше работали над полным проведением кинетического воззрения в какой-нибудь одной области, чем над практической проверкой его плодотворности на специальных проблемах во всех областях физики.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ МЕХАНИКА (приблизительно от 1860 до 1880 г.). Убежищами, в которых прежняя физика спасалась от трудностей, возникавших в связи с материей, служили силы, действующие непосредственно на расстоянии; надежности этих убежищ доверяли до такой степени, что, в конце концов, всю материю растворили в силах. Однако, когда узнали, что целые большие классы действий передаются на расстоянии не непосредственно при помощи *сил*, а посредством при помощи *движений наполняющей пространство материи*, и что законы этих действий можно вывести не из особых сил, а из особых движений, тогда вновь стали усердно вводить в круг исследования *материю*, ее *состав* и ее внутреннюю *структуру*. В то время как раньше оперирование атомами считалось для физика предосудительным и на всю атомистику смотрели довольно косо, теперь, напротив, все более усиливался *спрос на молекулярную физику*. В предыдущем отделе мы изложили попытки, предпринятые для того, чтобы придти к ней путем умозрения; однако в самом благоприятном случае эти попытки могли дать лишь основы для нового воззрения. Для полного построения нового здания, для завершения его в деталях, а также для проверки добытых дедуктивным путем результатов нужны были еще тщательный упорный труд и гениальная изобретательность физиков экспериментаторов, так как теперь от них требовалось не простое наблюдение внешних явлений, но и гораздо более трудное объяснение лежащих в их основе внутренних движений в материи.

В некоторых областях физики, а именно в *оптике*, в учении о *теплоте* и в *акустике*, этот метод праздновал уже свою победу и этим добился общего признания. В области же механики, несмотря на то, что его в отличие от динамического называли механическим, он еще мало преуспел. Успехи ньютоновских воззрений в области механики и системы твердых тел затмевали собою исследования, касавшиеся внутренних явлений в телах; долгое время в механике не умели ни правильно поставить, ни правильно использовать, ни работ по исследованию объемных изменений, вызываемых такими механическими силами, как растяжение и давление, ни работ по исследованию взаимодействия между твердыми, жидкими и газообразными телами. Хотя интерес

ной точки зрения представляется более правильным приписывать частям материи те же свойства, что и всей материи, — вместо того, чтобы наделять эти части такими свойствами, в непостижимости которых едва ли сомневается и сам Гирн.

258 ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОВ УПРУГОГО ПОСЛЕДЕЙСТВИЯ

к таким явлениям с начала нынешнего столетия и стал возрастать, но по началу — лишь медленно, и лишь в последнее время, под влиянием новых воззрений, он достиг относительной высоты и стал всеобщим. То обстоятельство, что в этой чисто механической молекулярной физике все еще продолжают играть большую роль молекулярные силы, не должно особенно удивлять: с одной стороны, они зачастую являются пережитками старых, по привычке еще сохранившихся представлений, а с другой стороны, — они служат вспомогательным средством во всех тех случаях, когда движения, лежащие в основе явлений, еще неизвестны. В самом деле, и согласно кинетической физике эти молекулярные силы допустимы и даже необходимы в качестве обозначения причин известных явлений, — если только не рассматривать их как окончательные причины, как элементарные силы.

Упругие свойства материи уже с давних пор представляли трудности, как для физиков, так и для философов, и даже физики ньютоновской школы большею частью признавали невозможность объяснить упругие свойства, исходя из одних только основных сил материи, — притяжения и отталкивания. Теперь к старым нерешенным еще загадкам присоединилась новая, более непосредственно указывавшая на зависимость действия силы от состояния движения. В 1835 г. Вебер² обратил внимание на одно явление, многократно, правда, наблюдавшееся и до него, а именно, что изменения формы, испытываемые упругими телами под действием внешних сил, достигают своего максимума только по прошествии некоторого времени после начала действия силы и что после прекращения внешнего воздействия первоначальная форма тел восстанавливается только спустя некоторое время. Он дал этому явлению название *упругого последействия* и объяснил его предположением, что движения молекул упругих тел, вызываемые внешними силами давления и натяжения, могут быть разложены на движения поступательные и вращательные; этому вращательному движению, стремящемуся вывести оси упругости молекул из их первоначального положения в другое, соответствующее новым условиям равновесия, должна противодействовать некоторая внутренняя сила, природа которой неизвестна, но сопротивление которой при каждом вращении молекул преодолевается только очень медленно². В 1849 г., в одной математической работе по упругости, к Веберу присоединился и Клаузиус³. Согласно последнему упругое последействие не может быть объяснено выделением теплоты, но скорее надо предположить, что во время действия внешних сил происходят *изменения и внутри тел*. Для случая равновесия, когда упругое последействие уже закончилось, и для случаев столь быстрых движений, что упругое последействие не играет роли, можно, поэтому всегда пользоваться формулами упругости, при-

¹ „Pogg. Ann.“, XXXIV, стр. 247, 1835; полностью в „Pogg. Ann.“, LIV, стр. 1, 1841.

² „Pogg. Ann.“, LIV, стр. 9.

³ „Über die Veränderungen, welche in den bisher gebräuchlichen Formeln für das Gleichgewicht und die Bewegung elastischer Körper durch neuere Beobachtungen nothwendig geworden sind“, „Pogg. Ann.“, LXXVI, стр. 46, 1849.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОВ УПРУГОГО ПОСЛЕДЕЙСТВИЯ 259

менными Вертгеймом и Коши. Если же приходится принимать во внимание и упругое последствие, необходимо видоизменить расчет таким образом, чтобы при определении напряжения принимать во внимание не только состояние тела в данное мгновение, но также и предшествующие его состояния. Согласно применяемым ныне формулам колебания тела при отсутствии каких-либо внешних препятствий должны были бы продолжаться бесконечно долго. Однако этому противоречит опыт, из которого явствует, что продолжительность звучания тел, находящихся вне каких-либо внешних влияний, различна; причина этого, как показал Вебер, может заключаться в упругом последствии тел. Клаузиус, подобно Веберу, ищет причину упругого последствия во *вращении* молекул, благодаря которому последние до известной степени следуют за напряжениями, действующими на них неодинаково по различным направлениям. При этом он не предполагает существования какой-либо особой силы, а прибегает лишь к допущению, довольно близкому к веберовскому, что вращения следуют за внешними воздействиями несколько *позднее*, чем смещения.

Однако особенно большое внимание явления упругого последствия возбудили только после опубликования в 1863 и 1866 гг.¹ обширных экспериментальных работ Ф. Кольрауша, который в принципиальном отношении тоже примкнул к точке зрения Вебера. В защиту допущенного им вращения молекул он указал на постоянно наблюдаемый частичный возврат струн после любых изменений высоты их тона к прежнему строю и отметил, что эта последняя перестройка струн, происходящая без всякого внешнего воздействия, может быть объяснена только *изменениями внутренних напряжений*, которые в свою очередь могут быть объяснены только вращениями молекул, при которых центры молекул не изменяют своих взаимных расстояний. Из своих многочисленных и точных опытов Кольрауш вывел следующие *законы упругого последствия*: 1) При изменении внешними силами формы твердого упругого тела молекулы последнего оказывают сопротивление одной части движения (вероятно, вращению их осей), вследствие чего новое положение равновесия наступает только спустя довольно продолжительное время ... При благоприятных условиях это движение бывает ясно заметно еще по прошествии ряда месяцев ... 2) Это упругое последствие по своей величине и продолжительности у различных тел различно. Оно установлено у всех исследованных тел, всего сильнее оно у тел органического происхождения... 3) От длительных изменений вследствие перехода через предел упругости оно, по-видимому, не зависит. 4) Скорость изменения формы, вообще говоря, прямо пропорциональна расстоянию x от положения покоя и обратно пропорциональна некоторой степени времени, отсчитываемого от момента первоначального изменения ... 5) При растяжении степень

¹ „Über die elastische Nachwirkung bei der Torsion“, „Pogg. Ann.“, CXIX, стр. 337, 1863; „Zur Kenntniss der elastischen Nachwirkung“, „Pogg. Ann.“, CXXVIII, стр. 1, 207 и 399, 1869. — Ф. Кольрауш (1840—1910) — профессор физики, сначала в Вюрцбурге, потом в Страсбурге, в 1895—1905 гг. — президент Государственного физико-технического института в Шарлоттенбурге.

260 ТЕОРИИ БОЛЬЦМАНА, НЕЕЗЕНА, КОЛЬРАУША И ДР.

времени сводится, как общее правило к первой; при кручении же, по крайней мере, для небольших смещений, имеем:

$$\frac{dx}{dt} = \alpha \cdot \frac{x}{t} \quad \text{ИЛИ} \quad x = \frac{c}{t^\alpha}.$$

б) Величина α имеет для различных веществ различную величину, но для одного и того же тела ее величина постоянна. Она может быть, поэтому названа коэффициентом упругого последствия... 7) Последствие возрастает с температурой t . 8) Повышение температуры в то время, когда частицы, под влиянием упругого последствия, приближаются к своему окончательному положению равновесия, увеличивает их скорость. Таким образом, под влиянием теплоты либо уменьшается сопротивление, либо, что, пожалуй, более вероятно, возрастает сила, стремящаяся повернуть молекулы в их положение равновесия¹. Больцман, совершенно не входя в рассмотрение внутреннего состояния тел, попытался², подобно Клаузиусу, разработать теорию упругого последствия, положив в основание своих математических выводов следующее допущение: *когда тело претерпевает ряд изменений своей формы, то более ранние формы производят еще некоторое влияние на нынешнее состояние молекулярных сил*; влияние это тем меньше, чем дальше отстоят по времени прежние формы; осуществление известного изменения формы требует меньшей силы, если ранее уже происходило изменение в том же направлении. О. Е. Мейер³ полагал, что упругое последствие происходит вследствие *внутреннего трения*, исходя из *молекулярного строения* тел, стремился объяснить упругое последствие и Неезен⁴. Согласно механической теории теплоты молекулы твердых тел колеблются около некоторого положения покоя или равновесия, которое зависит не только от сил, но и от движений соседних молекул. Если под влиянием внешних сил молекулярное равновесие в теле нарушается, то необходимо некоторое время для приспособления молекулярных движений по всей массе тела к новому положению равновесия; по прекращении же действия внешних сил опять-таки необходимо некоторое время для восстановления старого положения равновесия. Неезен показал, что по окончании кручения молекулы стержня, в соответствии с его теорией, продолжают еще в течение некоторого времени выполнять известные движения в направлении нового положения равновесия, и нашел, что допущения Больцмана согласуются и с его теорией⁵. Однако специальное определение молекулярных движений, соответствующих различным сложным явлениям последствия, представлялось и для него весьма сложной зада-

¹ „Pogg. Ann.“, CXXVIII, стр. 417—419.

² „Wiener Sitzungsber.“, LXX, стр. 275, 1874; „Pogg. Ann.“, доп. том VII. стр. 624, 1876.

³ „Pogg. Ann.“, CLI стр. 108, 1874.

⁴ „Pogg. Ann.“, CLVI, стр. 579, 1876. — F. Neesen (родился в 1849 г.) — профессор Артиллерийской и инженерной школы в Берлине.

⁵ „Pogg. Ann.“, CLVII, стр. 586.

чей. С этой точки зрения *против теории Неезена выступил Кольрауш*, опубликовавший новые интересные наблюдения над упругим последствием различных деформаций, сообщенных подряд одно за другим какому-либо телу ¹. А именно, если тело подвергнуть сначала более сильной или более продолжительной деформации, а затем меньшей и более кратковременной деформации в противоположном направлении и если после этого предоставить тело самому себе, то по началу будет преобладать более позднее последствие; но так как оно протекает быстрее последствия, следующего за первой деформацией, то при надлежащем соотношении величин деформаций более раннее последствие может спустя некоторое время получить перевес; таким образом, направление движения тела будет без всяких внешних воздействий менять свой знак. Кольрауш заканчивает свою статью следующими словами: «Я знаю немного столь поразительных явлений, как эти произвольные изменения движения неодушевленного тела. Если вообще вся область упругого последствия представляется в высшей степени своеобразной и до настоящего времени не нашла еще для себя какого-либо удовлетворительного физического объяснения, то во всяком случае одновременное существование нескольких последствий в одном и том же теле безусловно требует изменения тех представлений, которые лежат в основе современной теории упругости. Произвольное изменение одного направления деформации формы на противоположное прямо доказывает, что с одной и той же внешней формой могут быть связаны различные расположения молекул, и что существуют упругие силы, которые могут временно вывести форму тела из ее положения равновесия» ². Ф. Браун ³ попытался на большом числе опытов выяснить, основывается ли упругое последствие на том же *роде молекулярных движений*, что и *упругие смещения*, и не следует ли его рассматривать как остаток последнего, или же молекулярные движения, лежащие в основе обоих этих явлений, следует рассматривать как совершенно различные. На основании своих опытов он пришел к последнему выводу и, подобно Веберу и Кольраушу, склонялся к тому, чтобы приписать упругое последствие вращению молекул, но только для объяснения замедления этого вращения он не считал необходимым допустить какой-либо особой силы сопротивления и полагал возможным вывести его из известных уже молекулярных сил. Значительно дальше пошел в 1882 г. Н. А. Гезехус ⁴, попытавшийся связать упругое последствие с другими известными молекулярными действиями. Из наблюдений упругого последствия, произведенных на каучуке с помощью самопишущего прибора, он полагал возможным установить *аналогию законов упругого последствия с законами охлаждения*

¹ „Pogg. Ann.“, CLVIII, стр. 337, 1876.

² „Pogg. Ann.“, CLVIII, стр. 374—375.

³ „Pogg. Ann.“, CLIX, стр. 337, 1876. — F. Braun — профессор физики в Тюбингене.

⁴ „Журнал Русского физико-химического общества“, XIV, стр. 320, 1882. Извлечение автора в „Beiblättern zu Wiedem. Ann.“, VII, стр. 654, 1883. — Н. А. Гезехус (1845—1919) — профессор физики, сначала в Томске, затем — в Петербурге.

262 ВРЕМЯ УДАРА УПРУГИХ ТЕЛ

ждения и нагревания твердых тел, выделения водорода из насыщенного этим газом палладия, с законами гальванической поляризации электродов, далее — с законами оптического последействия или фосфоресценции и явлений остаточного электрического заряда. По мнению Гезехуса упругое последействие во всяком случае, зависит от коэффициента расширения, модуля упругости, нагревания исследуемого тела при его колебаниях и т. д.¹ Его статья заканчивается следующими словами: «Ни одна из предложенных гипотез в отдельности не в состоянии полностью объяснить всех явлений упругого последействия. Полная теория упругого последействия должна была бы исходить из весьма вероятной гипотезы об *обмене между внешним и внутренним эфиром* в телах, а также из гипотезы о *внутреннем трении* и о *взаимодействии между колеблющимися молекулами*».

Г. Шнебелли, измерив *время удара упругих тел*, т. е. продолжительность промежутка времени, в течение которого два ударяющихся тела находятся в соприкосновении, доказал, что скорости распространения упругих смещений при действии достаточно больших сил весьма значительны. Пуллье в 1845 г. нашел, что при очень кратковременном замыкании гальванического тока соответствующие отклонения стрелки гальванометра пропорциональны времени этого замыкания. В 1869 г.² Шнебелли бросал подвешенное в виде маятника тяжелое тело на твердую пластину и наблюдал продолжительность происходящего при ударе замыкания тока, полюсы которого были соединены с маятником и пластиною. Для стального цилиндра весом в 695 г, ударявшегося с высоты 33 мм о тяжелую стальную плиту, Шнебелли этим путем нашел время удара равным только 0,00019 сек. В общем, при ударе об одну и ту же плоскость, продолжительность его оказалась прямо пропорциональной массе ударяющего тела и обратно пропорциональной корню квадратному из модуля упругости; с возрастанием высоты падения время удара, как и следовало ожидать, сильно уменьшалось.

Все исследования над упругостью твердых тел, как и механическая теория тепла, приводили к тому выводу, что частицы твердых тел находятся в непрерывном движении и что при достаточно больших силах они столь же легко смещаются, как частицы жидкости под действием более слабых сил. *И действительно, на опыте удалось показать, что некоторые свойства жидкостей до известной степени присущи и твердым телам*, и таким образом удалось больше сблизить между собою агре-

¹ Некоторые из этих аналогий были уже высказаны раньше. Так, Кольрауш в своей работе 1866 г. о сопротивлении молекул вращению говорит следующее: „Это сопротивление, наоборот, находится в тесной связи с молекулярными процессами, или, — если смотреть на это явление с точки зрения теории теплоты, — с *молекулярными движениями*. Нельзя, по крайней мере, оставить без внимания возможности сведения к последействию ряда *электрических явлений* в изоляторах, и, между прочим, явление *остаточного заряда*. На основании распространенной теории магнетизма можно, по замечанию Видемана („Pogg. Ann.", CXXVI, стр. 1), с уверенностью рассчитывать, что некоторые *магнитные процессы* связаны с последействием" („Pogg. Ann.", CXXVIII, стр. 2).

² „Pogg. Ann." CXLIII, стр. 239 и CXLV, стр. 328. В новейшее время М. Гамбургер тоже воспользовался („Wied. Ann.", XXVIII, стр. 653) методом Пуллье для измерения времени удара.

ТЕКУЧЕСТЬ ТВЕРДЫХ ТЕЛ 263

сатные состояния тел, которые до тех пор так строго разграничивались. Так, А. -Э. Треска в середине шестидесятых годов пришел к выводу, *что твердые тела под сильным давлением вытекают из отверстия в сосуде совершенно так же, как жидкости под влиянием тяжести*. В достаточно прочный цилиндр, с небольшим отверстием на дне, он положил друг на друга несколько свинцовых кружков. Под действием сильного давления, достигавшего в отдельных случаях до 100 000 кг, кружки были выдавлены через отверстие в дне цилиндра в виде тонкой струи. Когда затем пластинки были разрезаны вдоль струи, то деформация отдельных слоев пластинок была заметна по тонким линиям раздела, по которым было видно, что движение свинцовых частиц происходило совершенно так же, как движение частиц жидкости. Когда металлические слои в цилиндре до известного предела уменьшались, то на вытекающей струе можно было даже наблюдать известное явление сжатия. Опыты с пластинками льда дали такие же результаты, но только выступающая струя была прорезана глубокими поперечными трещинами, несмотря на которые она оставалась прозрачной ¹. Кованое железо тоже удалось при помощи парового молота весом, в 12 000 кг продавить через отверстие в 48 мм в диаметре. Из этих опытов Треска вывел общее заключение, что каждое изменение формы твердого тела, происшедшее под действием внешних сил, можно рассматривать как результат течения отдельных частиц, которое идет от точек, где тело подвергается наиболее сильному давлению, по направлению к тем местам, где имеются наименьшие препятствия. В новейшее время Треска подтвердил это положение на деформациях прямоугольного параллелепипеда и цилиндра. Параллелепипед, сжатый с двух параллельных сторон, а с двух других параллельных сторон лишенный возможности расширяться вследствие сопротивления твердых стенок, перешел под влиянием давления в параллелепипед, растянутый в свободном направлении; цилиндр, сжатый между двумя плоскостями, прилегающими к его основаниям, превратился в цилиндр большего диаметра и меньшей высоты. Однако во всех случаях объемы сжимаемых тел до и после сжатия оставались неизменными ².

К подобным же взглядам на отношение твердых тел к давлению пришел около 1880 г. и Спринг ³. Если твердые тела способны под высоким давлением стать текучими, то следует ожидать, что под высоким давлением они могут *свариваться* друг с другом, что смеси твердых тел могут *вступать в химические соединения*, что они могут *кристаллизоваться* и переходить в *аллотропические модификации*. Действительно, при своих опытах над 83 различными веществами Спринг установил,

¹ „Comptes, rendus“, LIX, стр. 754, 1864; LX, стр. 398, 1865; LXIV, стр. 809, 1867. — Henri Édouard Tresca (1814—1885), сначала инженер, с 1852 г. — профессор Консерватории искусств и ремесел, с 1854 г. — также и Нормальной школы в Париже.

² „Comptes rendus“, XCVII, стр. 928, 1883; XCIX, стр. 104, 1884.

³ „Bulletin de l'Acad. Roy. Belgique“ (2), XLIX, стр. 323, 1880, „Recherches sur la propriété que possèdent les corps solides de se souder par l'action de la pression“.

264 ДИФФУЗИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

что эти предположения правильны. Когда опилки из висмута, кадмия и олова были смешаны в пропорции вудовского сплава и подвергнуты давлению в 7 500 ат, то получился цельный кусок металла, который, будучи затем вновь превращен в опилки и снова подвергнут тому же давлению, дал массу, *совершенно аналогичную сплаву* и плавившуюся при 70° С. *Призматическая сера под давлением перешла в более плотную октаэдрическую; аморфный фосфор при тех же условиях перешел в кристаллический и т. д.* На основании этих опытов Спринг признал доказанным, *что каждое тело, даже без сообщения или отнятия у него тепла, принимает то физическое или аллотропическое состояние, которое соответствует сообщенному этому телу объему*¹. В более поздней работе² он, подобно Треска, пришел к заключению, что вообще твердое тело, без перехода в другое агрегатное состояние, не может быть сжато или расширено на продолжительное время, и что, следовательно, длительная деформация твердого тела под влиянием давления может наступить только в результате *временного частичного перехода его в жидкое состояние*. Согласно этому представлению при чеканке монет металл не остается долгое время в сжатом состоянии под штампом, а вместо этого перетекает из сжатых мест в свободные; равным образом длительное искривление стержня следует приписать не частичному изменению его объема, а частичному перетеканию вещества с вогнутой стороны его на выпуклую.

С допущением непрерывного движения молекул в твердых телах согласуются наблюдения, показывающие, что при известных условиях *твердые тела диффундируют* друг в друга, как жидкости и газы. Диффузия угля в расплавленное железо была уже известна с давних пор. В 1878 г. Виолль³ случайно наблюдал на фарфоровом тигле, стоявшем внутри графитового тигля, диффузию угля в фарфор, а Сидней Марсден⁴ заметил, что уголь, накаливавшийся в тигле берлинского фарфора, местами даже проходил сквозь последний. Обширные опыты над диффузией твердых тел произвел впервые Альберт Кольсон в 1881 г.⁵ Согласно им во время прокаливания железа с сажей в восстанавливающей газовой среде не только уголь диффундирует в железо, постепенно превращая его в сталь, но также железо в значительном количестве диффундирует в уголь, причем последнее при относительно более низкой температуре (250°) происходит, по-видимому, даже легче, чем первое. Подобные же опыты с платиной не привели ни к какому результату, так что Кольсон считает диффузию твердых тел, точно так же, как и жидких, связанной с некоторым сродством диффундирующих веществ. Затем Кольсон наблюдал, опять-таки при накалива-

¹ Жаннетá, Неель и Клермон при повторении опытов Спринга пришли частично к другим выводам и оспорили, прежде всего, кристаллизацию под влиянием высокого давления. Спринг, однако, остался при своем мнении и указал на причины, которые могли вызвать неудачу опытов у других физиков („Beiblätter zu Wied. Ann.", VI, стр. 752; VII, стр. 103).

² „Bull. de l'Acad. Roy. Belg." (3), VI, стр. 507, 1883.

³ „Comptes rendus", XCIV, стр. 28, 1882.

⁴ „Proc. of the Roy. Soc. of Edinb.", X, стр. 712, 1880.

⁵ „Comptes rendus", XCIII, стр. 1074, 1881; XCIV, стр. 26, 1882.

ПРОНИКНОВЕНИЕ ГАЗОВ В ТВЕРДЫЕ ТЕЛА 265

нии, диффузию хлористого серебра в хлористый натрий; искусственное сернистое железо, положенное на медную пластинку, отчасти обратилось в сернистую медь, а фортепианная проволока, накалившаяся с известью в саже, усвоила заметные количества кальция. Особенно легко диффундировал через уголь кремнезем; так, окруженная углем и накаливаемая в фарфоровом тигле платиновая проволока скоро обнаружила некоторое содержание кремния, перешедшего из тигля.

На проникновение газов в металлы и другие твердые тела, равно как и на полную проницаемость последних для первых, теперь стали смотреть с новой точки зрения с повышенным интересом. Луйе уже в 1849 г.¹ произвел интересные в этом отношении наблюдения. «Если горизонтальную, вытекающую из капиллярного отверстия струю водорода направить на вертикально стоящий в нескольких миллиметрах от этого отверстия листок бумаги, то газ проходит через бумагу. Но газ не просеивается сквозь бумагу, как это можно было бы думать, — прошедшая струя сохраняет свою форму и может быть зажжена позади бумаги совершенно так же, как если бы последней вовсе не было. Губчатая платина, помещенная позади бумаги в направлении струи, тоже накаливается. Давления газа в 10—12 см водяного столба оказывается для этого достаточно. Те же явления, что с бумагой, имели место с листовым золотом и серебром. Струя проходит также через гуттаперчевые пленки, но через стеклянные стенки, даже очень тонкие, прохождение газа не было замечено».

В середине шестидесятых годов Сент-Клер-Девиль и Трост² в интересах санитарных исследований занялись более детально вопросом о прохождении газов через металлы. Чугунная печь, какая в Париже применяется для отопления военных караулен, была окружена железным колпаком. Печь разогревали до темного или светло-красного каления и затем из-под колпака брали воздух для анализа на содержание водорода и окиси углерода. В 1000 л воздуха оказалось при этом от 0,23 до 1,07 л водорода и от 0,22 до 0,71 л окиси углерода. При другом опыте водород настолько быстро ушел через стенки закрытых трубок из ковanej стали, накаливаемых в печи, что в этих трубках оказалось почти безвоздушное пространство. Таким образом проницаемость металлов для газов была доказана, и теперь вопрос шел лишь о том, следует ли ее рассматривать как проникновение газов через поры металлов, или как поглощение газа металлом на одной стороне и выделение его на другой. Опыты Калльетэ³ говорили в пользу первой точки зрения. Склепанный из тонких железных листов и замкнутый со всех сторон приемник, внутри которого проходила тонкая медная трубка для вывода оттуда газов, Калльетэ погружал в серную или соляную кислоту. Спустя некоторое время из медной трубки выходил чистый водород. Появление водорода Калльетэ объяснил следующим

¹ „Bull. de l'Acad. Roy. Belg.", XV, стр. 297, 1848; „Pogg. Ann.", LXXVIII, стр. 287. — P. L. Ch. E. Louyet (1818—1850) — профессор химии в Брюсселе.

² „Comptes rendus", LXVI, стр. 83, 1868; LXVII, стр. 965, 1868. — Et. H. Sainte-Claire-Deville (1816—1881) — профессор химии в Нормальной школе и в Сорбонне в Париже. Louis Troost (родился в 1826 г.) — профессор в Париже.

³ „Comptes rendus", LXVI, стр. 847, 1868. — L. Cailletet — академик в Париже.

266 АБСОРБЦИЯ ГАЗОВ

образом: газ, выделившийся в железе под действием проникшей в него кислоты и лишенный возможности выйти наружу через кислоту, проходил через железо внутрь приемника. Поэтому он полагал, что железо проницаемо для газов даже при обыкновенной температуре, а так как количество выделившегося водорода оказалось пропорциональным поверхности погруженного железного приемника, то представлялось, что ток газа вызывается не какой-нибудь особой силой, но свободно проникает через поры железа. Однако с этим выводом не согласился Т. Грэхем, раньше уже много занимавшийся вопросом о *поглощении газов* металлами. Он высказал мнение¹, что прохождение водорода через тонкие железные листы при низкой температуре, какая была при опытах Калльетэ, могло быть вызвано только самой кислотой; водород, правда, *поглощается* железом в значительном количестве при низкой температуре, но вновь *выделяется* им лишь при очень высокой, достигающей почти температуры ярко-красного каления. Подобные явления, согласно Грэхему, имеют место и у других металлов, платины и даже палладия, поглощающего водород сильнее всех прочих металлов. В форме губчатого порошка палладий поглощает 655 объемов водорода, но при обыкновенной температуре он не выделяет его даже в вакууме, а начинает терять газ только тогда, когда температура достигает 100°. «Я склонен поэтому думать,— говорит Грэхем, — что прохождению водорода через металл всегда предшествует сгущение или поглощение этого газа. Однако следует допустить, что скорость прохождения не пропорциональна объему поглощенного газа, в противном случае палладий был бы гораздо более проницаем при низкой температуре, чем при высокой. Пластинка палладия была совершенно освобождена от водорода при 267°; тем не менее, она оставалась проницаемой и ее проницаемость даже увеличивалась при более высоких температурах. Количество водорода, удерживаемого металлом при более высокой температуре, не может быть заметным; тем не менее, я полагаю, что некоторое количество его все-таки удерживается и что через металл проходит некий род быстрой цементации»². Но, конечно, указанный здесь факт, что палладий выделяет весь водород при 267° и становится, тем не менее, все более проницаемым, до известной степени говорит против мнения Грэхема, так как трудно допустить, чтобы металл при той температуре, когда он выделяет весь водород, все еще поглощал последний. Грэхем указал, между прочим, что, несмотря на то, что при обыкновенной температуре каучук теряет весь абсорбированный водород, он все-таки сильно проницаем для него и даже сильнее, чем для углекислоты, которую он удерживает в большом количестве³. Грэхем указал еще на то обстоятельство, что со свободным прохождением газов через поры

¹ „Einsaugung des Wasserstoffs durch Metalle“, „Pogg. Ann.“, CXXXIV, стр. 321, 1868. Также „Comptes rendus“, LXVI, стр. 1014, 1868.

² „Pogg. Ann.“, CXXXIV, стр. 328.

³ На проницаемость каучука для газов указал в 1841 г. Пейрон и доказал ее на опытах („Comptes rendus“, XIII, стр. 820; „Pogg. Ann.“, LVI, стр. 587). Согласно Пейрону эта проницаемость каучука почти совершенно исчезает после вымачивания его в льняном масле.

АБСОРБЦИЯ ГАЗОВ 267

металлов не согласуется тот факт, что металлы проницаемы не для всех газов вообще, а, насколько известно, *только для водорода и окиси углерода*, и что с этой стороны *проникновение газов через металлы аналогично диффузии жидкостей через перепонки*, где тоже одновременно происходит притяжение и выталкивание жидкостей.

Вообще Грэхем трактовал абсорбцию газов металлами совершенно своеобразно: он рассматривал ее не как чисто механическое действие внешних и внутренних поверхностей, а скорее *как некоторый род химического соединения*. Так как абсорбция водорода палладием сильно изменяет физические свойства последнего — его плотность, сцепление, электропроводность, и так как абсорбированный водород действует тоже иначе, чем свободный, то Грэхем представлял себе соединение обоих этих веществ в виде *сплава палладия с другим металлом, парами которого при этом является обыкновенный водород*¹.

Этот взгляд встретил со стороны многих физиков и химиков полное, а со стороны некоторых даже восторженное признание. Однако, так как водороду вместе с названием металла не было присвоено какого-либо нового качества и так как сплавы по своей природе оставались еще мало исследованными, то вся эта идея Грэхема принесла мало пользы или даже вовсе ее не принесла.

Объяснение проницаемости металлов для газов абсорбцией последних металлами представляло ту общую со всеми явлениями диффузии трудность, что оно не давало возможности решить, принадлежат ли действующие здесь силы к разряду чисто механических, или же они частично являются и химическими. Но поглощение газов, даже при чисто поверхностных механических действиях, всегда осложняется *уплотнением* газа, влияющим в свою очередь обратно на поглощение. Т. де-Соссюр² в 1812 г. заметил, что абсорбция газа пористыми телами

¹ „Über das Verhalten des Wasserstoffs zum Palladium“, „Pogg. Ann.“, CXXXVI, стр. 317, 1869; из „Comptes rendus“, LVIII, стр. 101. „Neue Beobachtungen über das Hydrogenium“, „Pogg. Ann.“, CXXXVIII, стр. 49, 1869; из „Comptes rendus“, LVIII, стр. 1511. Присутствие водорода в *метеоритных* массах Грэхем доказал уже ранее („Comptes rendus“, LIV, стр. 1067, „Pogg. Ann.“, CXXXI, стр. 151, 1867); по его мнению, здесь тоже можно предположить наличие сплава железа с металлом водородом. Кусок метеорита из Ленарто, промытый горячей калийной щелочью и потом несколько раз водой и, наконец, освобожденный насколько возможно от всех газов с помощью шпренгелевского аспиратора, при накаливании все еще выделял газ в количестве в 2,85 раза большем собственного объема, и этот газ состоял на 86% из водорода. Опыты Грэхема с поглощением газов металлами были подтверждены в 1881 г. Ганнеем („Proc. of the Roy. Soc.“, XXXII, стр. 407). При опытах по искусственному изготовлению алмазов он зачастую наблюдал кажущееся исчезновение "водорода и углеводородов из толстостенных (2 дюйма) трубок, хотя проверка с помощью гидравлического пресса не выявляла возможности какого-либо просачивания. Оказалось, что это исчезновение происходило вследствие абсорбции. Другие твердые тела, например стекло, сильно поглощали кислород и угольную кислоту даже при температуре свыше 200° и под давлением в 200 ат. Абсорбированные газы удерживались этими телами при их охлаждении, когда давление оставалось неизменным, и выделялись только с повышением температуры.

² „Sur l'absorption des gaz par différents corps“, „Ann. de chim. et de phys.“, XLIX и L, 1812; „Gilbert's Ann.“, XLVII, стр. 113, 1814.

268 ЗАКОНЫ АБСОРБЦИИ ГАЗОВ

всегда сопровождается выделением теплоты. Митчерлих¹ высказал предположение, что абсорбированные углем газы находятся в нем в *жидком состоянии*. Фавр и Зильберман в 1853 г.², пользуясь теплотой поглощения, прямо доказали, что плотность газов, поглощенных на поверхности твердых тел, например угольной и сернистой кислот, должна быть больше, чем плотность этих же веществ в *жидком* или даже, вероятно, в *твердом* состоянии. В это же время Квинке³ в своих работах исходил из допущения, что приставший к поверхности твердого тела слой газа вблизи этой поверхности имеет плотность, одинаковую с телом, а с удалением от нее она уменьшается до плотности окружающей газовой среды, откуда следовало, что *сгущение газов на твердом теле прямо пропорционально плотности этого тела*. Г. Фр. Вебер⁴ в 1872 г. пришел к выводу, что количества различных газов, которые поглощаются на поверхности какого-либо твердого тела, или *так называемые поверхностные слои (Wandschichten), прямо пропорциональны квадратным корням из плотностей газов и, следовательно, обратно пропорциональны их молекулярным скоростям*. О. Мейер в 1877 г.⁵ нашел, что этот закон вполне согласуется с воззрениями механической теории теплоты. Согласно ему прилипание газовых частиц к твердым телам следует объяснить силами притяжения, которые удерживают на стенке попадающие на нее частицы, либо его следует объяснить таким образом, что легкие газовые молекулы, при своих столкновениях с более грубыми молекулярными агрегатами твердой стенки, зачастую совершенно теряют свою кинетическую энергию и остаются на стенке в состоянии покоя до какого-нибудь нового толчка, который вновь приведет их в движение. Согласно обоим этим взглядам следует предположить, что полной потере скорости могут подвергнуться только медленнее движущиеся молекулы; более же быстрые сохраняют еще достаточно энергии, чтобы отразиться от стенки. Это и привело Мейера к выводу, что *абсорбция газа должна быть обратно пропорциональна средней скорости молекул, или, что то же, прямо пропорциональна плотности газа*. Однако при экспериментальном измерении абсорбции газов с помощью стеклянных нитей Кайзер⁶ установил, что этот закон не подтверждается. Количество абсорбированного газа зависит, согласно его данным, во-первых, от плотности газового слоя на стенке, которая определяется *взаимодействием между*

¹ „Ann. de chim. et de phys." (3), VIII, стр. 18, 1844. — E. Mitscherlich (1794—1863) — профессор химии в Берлине.

² „Ann. de chim. et de phys." (3), XXXVII, стр. 406, 1853. Шаппюи („Arch. de scienc. phys. et nat." (3), VI, стр. 225, 1681) в новейшее время подтвердил эти данные; согласно ему теплота, развивающаяся при поглощении газа жидкостью, как общее правило, меньше той, какая выделяется при абсорбции того же газа твердым телом, но всегда больше теплоты сжигания этого газа.

³ „Pogg. Ann.", CVIII, стр. 326, 1859.

⁴ „Tageblatt der 45 Naturf.-Versamml.", стр. 113, Leipzig 1872.

⁵ „Kinetische Theorie der Gase", стр. 309, Breslau 1877.

⁶ Heinr. Kayser (профессор в Ганновере), „Über die Verdichtung von Gasen an Oberflächen in ihrer Abhängigkeit von Druck und Temperatur", „Wied. Ann.", XIV, стр. 450, 1881. „Важный шаг от пористых тел с неизвестною поверхностью,— говорит Кайзер, — к пучкам стеклянных нитей с известною поверхностью сделал Магнус" („Pogg. Ann.", LXXXIX, стр. 604, 1853).

ЗАКОНЫ АБСОРБЦИИ ГАЗОВ 269

газом и стенкой, и, во-вторых, от толщины сгущенного газового слоя, которая обуславливается уже природою самого газа. При дальнейшем исследовании оказывается, что первое явление обуславливается имеющимися на поверхности тела свободными молекулярными силами, равно как химическим сродством между газом и стенкою, а последнее зависит от расстояния между молекулами газа, от скорости молекул, от температуры и, наконец, от силы сцепления газа. Опыты подтвердили, что повышение давления усиливает, а повышение температуры, наоборот, понижает абсорбцию и что последняя зависит, прежде всего, от природы газа: легче сгущаемые газы всегда проявляли и сильную абсорбцию. Однако, вполне надежных общих законов, ввиду сложности этих явлений, получить не удалось.

Частью совершенно противоположные результаты получил Бунзен¹, который ввел в круг исследования новый элемент — время. Бунзен воспользовался при своих опытах (подобно Кайзеру) капиллярными стеклянными нитями, какие применяются в стекляннопрядильном производстве. Нить длиною в 62 геогр. мили весит всего 150 г, представляя поверхность в 23 м², занимает объем всего только в 100 см³; поэтому она допускает столь малую внутреннюю абсорбцию, какая только возможна. Из наблюдений над абсорбцией угольной кислоты Бунзеном были введены следующие законы: «1) Стационарное состояние сгущения газа не наступает не только через несколько часов или дней, но даже через несколько лет. 2) В течение трехлетнего периода опыта, несмотря на внезапные и постепенные изменения давления и температуры, никогда не происходило заметного отделения сгустившейся на поверхности углекислоты. 3) Внезапные изменения ртутного давления от 0,3521 до 0,5696 м, от 0,5450 до 0,7171 м, от 0,7168 до 0,5355 м и от 0,4431 до 0,5248 м не дали никакого заметного изменения в непрерывном ходе сгущения газа. 4) В температурном интервале от +23 до —0,8° С с повышением температуры происходит ускорение, а с понижением — замедление процесса сгущения газа. 5) Поверхность стекла в 13,628 м² по истечении первого года абсорбировала 42,91 см³ углекислоты, по истечении второго года — 57,94 см³ и по истечении третьего года — 69,98 см³, т. е. за первый год она абсорбировала 42,91 см³, за второй — 15,03 см³ и за третий — 12,04 см³. Таким образом, за три года на 1 м² поверхности стекла было сгущено 5,135 см³ при 0° и 0,76 м давления»². Расхождение этих выводов со всеми ранее полученными результатами Бунзен объясняет неправильностью установившегося в прежнее время предположения, будто максимум сгущения газа наступает уже через несколько часов или дней, вследствие чего все последующие изменения абсорбции приписывали изменениям давления или температуры. Бунзен опровергает и другое предположение, будто в данном случае имеет место не явление прилипания, а только химическое разложение стекла, указывая,

¹ „Wied. Ann.“, XX, стр. 545, 1883. — Rob. Wilh. Bunsen (1811—1899), в 1838 г. профессор химии в Марбурге, в 1851 г. — в Бреславле, а с 1852 г. — в Гейдельберге.

² Газ, остававшийся еще на стеклянных стенках при давлении 0,99 мм ртути, не был здесь принят во внимание („Wied. Ann.“, XX, стр. 555—556).

270 ЗАВИСИМОСТЬ АБСОРБЦИИ ОТ ВРЕМЕНИ

что слабый угольный ангидрид не в состоянии разложить силикатов стекла. Поэтому, по мнению Бунзена, здесь возможно лишь следующее чисто механическое объяснение явлений. «Подобно тому, как тяжелая твердая или жидкая масса окружается газовой атмосферой убывающей плотности, точно так же на поверхности твердых и жидких тел должны образоваться, вследствие капиллярных притяжений, газовые скопления убывающей плотности, а так как эти исходящие из поверхности притяжения, по исследованиям Квинке, могут быть прослежены на расстоянии $0,000005 \text{ см}$, то сгущенные в течение трех лет на $10\ 000 \text{ см}^2$ стеклянной поверхности $5,135 \text{ см}^3$ углекислоты при 0° C и $0,76 \text{ м}$ ртутного давления должны заключаться в пространстве $0,05 \text{ см}^3$, т. е. *по меньшей мере*, сгуститься от $5,135$ до $0,05 \text{ см}^3$. Но такому сгущению соответствует давление в $102,7 \text{ ат}$. Так как углекислота при температуре наблюдения 19° C уже становится жидкой под давлением $57,5 \text{ ат}$, то не может подлежать никакому сомнению, *что поверхность стекла покрыта слоем жидкой углекислоты*. Если бы весь газ, заключающийся в упомянутых $5,135 \text{ см}^3$, находился в жидком состоянии, то, так как удельный вес жидкой углекислоты при 19° C равен $1,137$, — толщина этого слоя под атмосферным давлением составила бы только $0,000008 \text{ мм}$. Легко, однако, понять, что этот слой никогда не может переступить той высоты, на которой убывающее с расстоянием капиллярное давление становится равным упругости пара жидкой углекислоты, и что выше этого предела все еще должна существовать атмосфера газообразной углекислоты убывающей плотности. Эти соображения, правда, объясняют наблюдаемое сгущение газа, но не объясняют, почему этот процесс сгущения растягивается на ряд лет. В соответствии с опытом теория скорее требует мгновенного наступления состояния равновесия в газовых массах, подверженных давлению. *Поэтому значительная продолжительность сгущения газа едва ли может быть объяснена иначе, чем на основе допущения, что стекло не вполне проницаемо для газов и что частицы жидкой углекислоты, проникая в промежутки между молекулами стекла, должны преодолевать сопротивление, которое, как показывает наблюдаемый ход сгущения газа, с течением времени возрастает*. Только дальнейшие наблюдения могут решить вопрос, существует ли такой момент, когда проникновение жидкой углекислоты в стекло можно признать исчезающе малым. Если бы такой момент существовал, то после наступления его процессы сгущения газа должны были бы существенно измениться, тогда толщина слоя жидкой углекислоты не уменьшалась бы более вследствие проникновения ее внутрь стеклянной массы, наряду с увеличением высоты облегающей углекислотой атмосферы. Вместе с утолщением жидкого слоя при продолжающемся сгущении облегающая углекислая атмосфера должна скорее уменьшаться в высоту, а вместе с нею должно постоянно уменьшаться и давление со стороны этой атмосферы на поверхностный слой жидкости; это должно было бы продолжаться до тех пор, пока давление на поверхность жидкости не достигло бы величины упругости пара углекислоты при существующей температуре. С наступлением такого момента на поверхности жидкого слоя углекислоты, при прочих равных условиях, уже не может далее

ЗАВИСИМОСТЬ АБСОРБЦИИ ОТ ВРЕМЕНИ 271

иметь места ни сгущение, ни испарение; но когда давление или температура изменяются, они вновь тотчас же появляются». В конце своей статьи Бунзен упоминает, что атмосферный воздух ведет себя по отношению к гладким стеклянным поверхностям аналогично углекислоте и что, напротив, у угля и у подобных ему пористых тел стационарное состояние сгущения газа наступает сравнительно быстро. Эти выводы Бунзена не остались без возражений. Прежде всего, Кайзер¹ указал, что проникшая якобы в стекло углекислота вероятнее всего была абсорбирована жирной смазкой стеклянных приборов и диффундировала через нее в воздух. Бунзен опроверг² это возражение на опытах с приборами без смазанных жиром притертых частей; но затем в следующей работе³ занялся более детальным исследованием того влияния, которое оказывают на сгущение газов осаждающиеся на поверхности стекла налеты влаги, остающиеся там, несмотря на тщательное высушивание. И действительно, он нашел, что осевший на стеклянных нитях налет влаги испарялся постепенно лишь при температуре в 503° С, тогда как после высушивания нитей путем длительного пропускания сухого воздуха при температуре 215° на них все еще оставался слой воды в 0,00000645 мм толщины, при 107° — слой в 0,00000703 мм, а при 23° — слой толщиной в 0,00001055 мм. Конечно, влияние этого слоя воды при температурах ниже 500° должно быть довольно значительным, однако оказалось, что как раз при наличии этого влияния приведенные Бунзеном в его первой работе законы и объяснения сгущения газов сохраняют полную силу.

Подобную же ненадежность по вопросу о природе действующих сил представляли тогдашние воззрения на сущность *растворов твердых тел в жидкостях* и на их положение между механическими смесями и химическими соединениями. Длительная неизменность состава растворов указывала на близость их к химическим соединениям. Некоторые физики, правда, утверждали, будто им удавалось наблюдать выпадение растворенного вещества из растворителя, хотя и весьма медленное. Однако значительно большее число физиков придерживалось противоположного мнения. Либен, например, показал в 1857 г.⁴ что раствор поваренной соли, остававшийся в течение четырех месяцев в вертикальной стеклянной трубке длиной в два метра, после вскрытия ее дал во всех слоях такое же отношение между содержанием соли и жидкости, какое было в начале опыта. В. Алексеев⁵ попытался объяснить положение растворов между смесями и соединениями с помощью действия молекулярных сил. По его мнению, растворы являются продуктами чисто физического взаимодействия их составных частей. В первую очередь растворение обуславливается сцеплением растворяемого тела,

¹ „Wied. Ann." XXI, стр. 495, 1884.

² Там же, XXII, стр. 145, 1884.

³ Там же, XXIV, стр. 321, 1885.

⁴ „Liebig's Ann.", CI, стр. 77, 1857. — А. Lieben (родился в 1836 г.) — профессор химии Венского университета.

⁵ „Ber. d. deutsch. chem. Gesellsch.", XVI, стр. 2273; XVII, стр. 38, 1884.— В. Ф. Алексеев (1852—1919) — физико-химик, профессор Горного института в Петербурге.

272 ЗАКОНЫ РАСТВОРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ В ЖИДКОСТЯХ

так как чем слабее сцепление, тем больше растворимость. Вызывается же растворение прилипанием; растворение газов аналогично прилипанию газов к твердым телам. Жидкости с весьма различным сцеплением не прилипают друг к другу и не растворяются друг в друге. Твердые тела обладают всегда меньшей растворимостью, чем жидкости, и растворяются (вследствие равновесия между сцеплением и слипанием) только в известном отношении. Растворы двух жидкостей относятся к жидким смесям, как изоморфные смеси к сплавам. Пересыщенные растворы — это такие растворы, в которых растворенное вещество находится в переохлажденном состоянии. Ле-Шателье¹, пытавшийся около 1885 г. в нескольких статьях вывести законы химического равновесия из простых исходных предположений, пришел при этом и к законам растворов. Из выведенной им формулы $dx/x = k/\delta \cdot Q \cdot dt/T^2$, где x обозначает коэффициент растворимости, Q — теплоту растворения при насыщении и t — температуру раствора, вытекало, по крайней мере давно уже признанное верным правило, что изменение dx/dt растворимости соли имеет одинаковый знак с теплотой насыщения Q , т. е. что растворимость возрастает вместе с температурой у всех тел, которые при растворении поглощают тепло, и обратно.

Как при растворении, так и обратно при выкристаллизовывании солей из растворов действующие причины не были еще вполне выяснены. Баумгауер указал в 1868 г.², что помимо сильного охлаждения и продолжительного выпаривания, пересыщенные соляные растворы могут быть доведены до выкристаллизовывания соли только путем соприкосновения их с частицей одинаковой или изоморфной соли. Томлинсон³ в том же году высказал мнение, что кристаллизация вызывается соприкосновением с поверхностями, загрязненными органическими веществами, жирными или маслянистыми налетами, которые изменяют поверхностное натяжение в растворах. В противовес ему Ливерсайдж⁴ выступил с защитой взглядов, аналогичных взглядам Баумгауера, так как согласно его опытам только кристаллы той же соли действуют как зерна кристаллизации. Подобные зерна носятся уже в воздухе, откуда, попав в раствор или пристав к жирным, маслянистым налетам на телах, они вызывают наблюдаемую Томлинсоном кристаллизацию. Но в то же время, наоборот, толстые слои жира или масла, покрывающие жидкости, оказываются лучшим средством для того, чтобы предотвратить кристаллизацию пересыщенного раствора. К подобным же результатам пришел Жерне⁵, который уже в 1886 г.⁶ нашел, что твердые тела при погружении их в жидкости только тогда выделяют растворенные в последних газы, когда поверхность самих тел

¹ „Comptes rendus“, XCIX, стр. 786; C, стр. 50 и 441; CI, стр. 1005 и т. д., 1885.

² „Erdmann's Journ. f. pract. Chemie“, CIV, стр. 449.

³ „Proc. of the Roy. Soc.“, XX, стр. 41; также стр. 342, 1868.

⁴ Там же, стр. 497.

⁵ „Comptes rendus“, LXXV, стр. 1705, 1872.

⁶ Там же, LXIII, стр. 217, 1866.

ЗАКОНЫ РАСТВОРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ В ЖИДКОСТЯХ 273

покрыта газом, и что после удаления этого поверхностного слоя выделения газов не происходит. Эти явления напоминают, — разумеется, отдаленным образом, — резонанс колебательных движений, где колебание воспринимается материей только в том случае, когда части ее по своему положению и по своим свойствам настроены соответствующим образом. Однако весьма вероятно, что в растворенном веществе всегда имеется некоторое стремление к прочному состоянию равновесия и что пересыщенный раствор может кристаллизоваться и от действия неоднородного с ним вещества, если только последнее в состоянии, с помощью новых молекулярных сил или движений, нарушить молекулярное равновесие раствора.

Подобно сгущению газов на поверхности твердых тел более внимательное изучение капиллярных явлений указывало, по-видимому, на возможность *сгущения жидкостей на поверхности твердых тел*. В 1857 г. в «Comptes rendus»² появилось краткое сообщение Вертгейма о капиллярных явлениях, дополненное в 1861 г. в «Ann. de chim. et de phys.» материалами из его посмертных работ², где Вертгейм доказал, что основы капиллярной теории Юнга и Лапласа неточны в том отношении, что эти физики допускали пропорциональность между поднятым объемом жидкости и длиной линии соприкосновения жидкости с твердым телом. Лаплас утверждал, *что объемы жидкости, поднимающейся между параллельными плоскостями, исчисленные на единицу длины линии соприкосновения, всегда одинаковы, и что количества жидкости, поднимающейся в трубках, всегда вдвое больше предыдущих*. Вертгейм, подтвердив первое положение, вместе с тем нашел, *что в одной и той же трубке высоты поднятия для некоторых жидкостей были меньше, а для других больше тех, какие должны были бы быть согласно второму положению Лапласа, и что в различных трубках объемы поднявшейся жидкости варьировали с диаметрами трубок*. Вертгейм поэтому считал необходимым допустить для различных жидкостей и различных диаметров трубок *различие в толщине слоев жидкости*, приставших к стенкам твердых тел и молекулярно изменившихся. Десен³, однако, и после Вертгейма полагал возможным сохранить *полное постоянство* отношения поднявшихся объемов жидкости между плоскими пластинками и в трубках. Отклонение результатов Вертгейма он приписал *неполному смачиванию* поверхностей в его опытах. Вильгельми в 1863 г., напротив, вновь подтвердил данные Вертгейма на основании новых тщательных опытов, проведенных при другой установке⁴. Если тело простой правильной формы, например

¹ „Comptes rendus“, XLIV, стр. 1022.

² „Ann. de chim. et de phys.“ (3) LXIII, стр. 129.

³ „Comptes rendus“, XLV, стр. 225, 1857.

⁴ „Über die Abhängigkeit der Capillarconstanten des Alkohols von Substanz und 'Gestalt der benetzten Körper“, „Pogg. Ann.“, CXIX, стр. 177, 1863. „Über die Abhängigkeit der Capillaritätscoefficienten der Flüssigkeiten von ihrer Zusammensetzung“, „Pogg. Ann.“, CXXI, стр. 44, 1864. „Über die Abhängigkeit der Capillaritätscoefficienten der Flüssigkeiten von der chemischen Beschaffenheit und der Gestalt der festen Wand“, „Pogg. Ann.“, CXXII, стр. 1, 1864. В последней статье Вильгельми обещал дать дальше продолжение своих исследований, но умер, не успев довести их до конца.

274 ВЫЧИСЛЕНИЕ КАПИЛЛЯРНОЙ ПОСТОЯННОЙ

прямоугольную пластинку или цилиндр, вес которого в воздухе равен P , погрузить до определенной глубины в жидкость и определить в этом положении его вес Π , а также определить вес вытесненной воды V . и вес поднявшегося около него вследствие капиллярности объема жидкости A , то должно быть $\Pi = P - V + A$. Если здесь положить A равным произведению длины λ линии соприкосновения (между жидкостью и телом) на вес поднятой жидкости, приходящейся на единицу длины линии соприкосновения, а V равным произведению удельного веса s жидкости на погруженный объем v тела, то получится $\Pi = P - vs + \alpha\lambda$, откуда легко определяется капиллярная постоянная $\alpha = (\Pi - P + vs) / \lambda$. Однако, Вильгельми, подобно Вертгейму, отметил, что вычисленная таким путем постоянная в действительности не характеризует собой данной жидкости, а изменяется в зависимости от формы и вещества погруженного тела. Можно допустить, что *эти изменения происходят вследствие прилипания слоя жидкости к поверхности погруженного тела и, может быть, от сгущения ее на этой поверхности*; в таком случае эту часть жидкости не следовало бы прибавлять к вытесненной телом, и предыдущая формула превратилась бы в следующую: $\Pi = P - vs + O\beta + \alpha\lambda$, где O обозначает погруженную поверхность, а β — сгущенную на единице поверхности часть жидкости или *коэффициент сгущения*. Следовательно, если одно и то же тело погрузить несколько раз в какую-нибудь жидкость до различной глубины, то из полученных при этом различных уравнений можно исключить член α . и затем вычислить β , α после этого и α . Для гладких плоских пластинок, погруженных в алкоголь, Вильгельми получил следующие величины:

Для стекла..... $\beta = 0,0125932$ $\alpha = 2,3250$

„ серебра $\beta = 0,0151214$ $\alpha = 2,4444$

„ латуни..... $\beta = 0,0232646$ $\alpha = 2,4476$

„ цинка..... $\beta = 0,007089$ $\alpha = 2,3263$

„ алюминия . $\beta = 0,0071589$ $\alpha = 2,3065$ ¹

тем самым было доказано *различие коэффициента сгущения* для различных твердых веществ. Этим же путем Вильгельми установил различие коэффициентов сгущения у одних и тех же веществ, когда лишь кривизна поверхностей твердых тел была неодинакова. Однако интересно, что и после введения в формулы коэффициента сгущения все еще, как прежде у Вертгейма, но только в меньшей степени, оставались налицо *расхождения в величине постоянной капиллярности α* . Вертгейм приписывал причину наблюдаемых им расхождений *различной толщине сгущенных на твердых телах слоев жидкости в зависимости от кривизны поверхности*. Вильгельми же видел причину этих наблюдаемых и им отклонений в величине так *называемого краевого угла*, зависящей от сгущенных слоев и *изменяющейся вместе с ними*. До сих пор этот угол у смачивающих жидкостей считали всегда

¹ „Pogg. Ann.“, CXIX, стр. 194.

КАПИЛЛЯРНОЕ ПОСЛЕДЕЙСТВИЕ 275

равным 0 или 180°. Вильгельми же обратил внимание на то обстоятельство, что согласно новым опытам жидкости поднимаются не непосредственно по твердому телу, а по слою жидкости, сгущение которой изменяется вместе с поверхностью, и что в зависимости от этого сгущения должен изменяться и краевой угол. Позднее к Вильгельми, прежде всего по последнему вопросу, примкнул и Квинке, уже давно заметивший колебания капиллярной постоянной при своих многочисленных измерениях этой величины, но давший им сначала иное объяснение². Относительно отклонения краевого угла у смачивающих жидкостей от 0 или 180° он в 1877 г. высказал следующее³: «Краевой угол водных растворов соли для стекла колеблется от 20 до 30°, между тем как до сих пор соляные растворы обычно рассматривали как жидкости, смачивающие стекло, и краевой угол их принимали равным 0°, вследствие чего величина капиллярной постоянной преуменьшалась приблизительно на 10%»⁴. В этой же статье Квинке исследует упомянутое уже Гагеном и Вильгельми *изменение капиллярной постоянной с течением времени*. «Очень интересны, — говорит он, — изменения, выступающие постепенно после образования уже свободной поверхности жидкостей и продолжающиеся очень долго; я мог бы их сравнить с тем явлением в твердых телах, которое Вильгельм Вебер назвал упругим последствием. Эти явления указывают сначала на быстрое, а затем на все более и более медленное уменьшение сцепления или поверхностного натяжения. У простых жидкостей, как чистая вода или чистый алкоголь, такое уменьшение составляет только несколько процентов начальной максимальной величины, но с прибавлением незначительных количеств соли или кислоты оно очень значительно повышается»⁵. Рассмотрев разнообразные допущения для объяснения этого явления, Квинке приходит к заключению, что, действительно, проще всего было бы признать его аналогичным *упругому последствию твердых тел*, и затем продолжает: «Подобно тому, как упругое положение равновесия частиц твердого тела наступает лишь постепенно или по истечении бесконечно долгого времени, точно так же могло бы постепенно наступать и положение равновесия пограничных частиц жидкости. Необходимо некоторое время для того, чтобы стало стационарным то изменение молекулярной структуры, которое частицы жидкости проявляют на поверхности соприкосновения с воздухом или другими жидкостями и которое может быть обнаружено по одновременному изменению температуры, электродвижущей силы и по другим свойствам. Капельные жидкости должны обладать и в этом отношении такими же свойствами, как и так называемые твердые тела»⁶.

¹ В пользу существования на поверхности твердого тела пограничного слоя жидкости неодинаковой плотности и различной толщины в 1861 г. снова очень определенно высказался Муссон („Vierteljahrsschrift der naturf. Gesellschaft in Zürich", XV, стр. 305, 1871; Klein, „Revue der Fortschritte d. Naturw.", II, стр. 3).

² „Pogg. Ann.", CXXXIX, стр. 89, 1870. — G. Quincke (1834—1924) — профессор физики в Гейдельберге.

³ Там же, CLX, стр. 337 и 560, 1877.

⁴ Там же, стр. 339.

⁵ Там же, стр. 340.

⁶ Там же, стр. 584.

276 РАСТЕКАНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Приведенное выше положение о краевом угле Квинке в появившейся вслед затем работе о растекании жидкостей по твердым телам ¹ дополняет следующими положениями: «Краевой угол, образуемый свободными поверхностями различных жидкостей, как вода, алкоголь и т. д. а также водных и спиртовых растворов солей, — с чистым стеклом, хрустальными и металлическими поверхностями, равен 0° . Жидкости растекаются по чистым твердым поверхностям. Если краевой угол, как это обыкновенно бывает, имеет большую величину, это значит, что твердая поверхность покрыта (незаметным) тонким слоем постороннего вещества, с толщиной которого изменяется и краевой угол. Толщина этого тонкого слоя, однако, не должна превышать некоторой определенной максимальной величины, а именно величины радиуса сферы действия молекулярных сил. Этот тонкий слой, прилипший к поверхности твердого тела, может состоять из твердого, жидкого или газообразного вещества. Он может состоять также из самой растекающейся жидкости и может быть обнаружен не только по краевому углу, но также по так называемой ползучести солей или по электропроводности на поверхности твердого тела, а в отдельных случаях — с помощью интерференционных цветов отраженного от него света. Незаметно тонкие слои одной и той же жидкости имеют, в зависимости от продолжительности и способа их возникновения, или от природы твердого тела, к которому они прилипают, — различные свойства. Быстро образовавшиеся капли воды растекаются по свежевывчищенной стеклянной поверхности легче, чем медленно образовавшиеся. Эти чрезвычайно тонкие слои постороннего вещества составляют, по-видимому, и причину расхождения между теорией и опытом при определении поверхностного натяжения на общей границе между жидкостью и твердыми телами. Если краевой угол равен 0° , или же он невозможен, то происходит растекание жидкости по поверхности твердого тела. В жидкостях, которые смешиваются в любом соотношении, жидкость с меньшим поверхностным натяжением вытесняет ту жидкость, у которой поверхностное натяжение больше. Однако это поверхностное натяжение и возможное вытеснение изменяются с природою твердого вещества. Изложенное является дополнением к теории Брюке о поверхностной диффузии вдоль твердой стенки. Присутствие других жидкостей и в особенности воздуха может существенно видоизменить распространение жидкости по твердой поверхности. Зависимость краевого угла от толщины незаметно тонкого слоя на твердой поверхности объясняет потные изображения Мозера и Вайделе, полученные с водяным паром, световые изображения Дагерра с парами ртути, электрические потные изображения Карстена и Рисса с парами воды, ртути и йода» ².

¹ „Wied. Ann.“, II, стр. 145, 1877.

² Упомянутая здесь статья Квинке является продолжением и исправлением его большой работы 1870 г. „Über Capillaritätserscheinungen an der gemeinschaftlichen Oberfläche zweier Flüssigkeiten“ („Pogg. Ann.“, CXXXIX, стр. 1). Мы лишены возможности упомянуть здесь о многих других появившихся около этого же времени работах по вопросу о величине и свойствах поверхностного натяжения. Обращаем только особое внимание на работу Фр. Мельде

СВОБОДНАЯ ДИФФУЗИЯ СОЛЯНЫХ РАСТВОРОВ 277

Если при изучении капиллярных явлений ученые еще целиком оставались на почве динамической физики¹ и при наблюдении растекания жидкостей думали только об отталкивательных силах, а не об отталкивательных движениях, то при изучении *диффузии жидкостей* уже начали появляться следы кинетических аналогий. Еще до разработки механической теории газов и, следовательно, раньше, чем стала возможна какая-либо кинетическая теория диффузии газов, А. Фик² путем тщательных исследований установил, что *свободная диффузия соляных растворов происходит по законам совершенно аналогичным законам распространения тепла в твердых телах*. В полном соответствии с известным законом Фурье Фик установил для свободной диффузии солей закон, согласно которому количество соли, проходящее за известное время в направлении убывающей концентрации через некоторый элемент поверхности, должно быть пропорционально *величине этого элемента поверхности, промежутку времени, величине убывания концентрации на месте нахождения элемента поверхности то направлению течения и, наконец, постоянной диффузии k* , величина которой зависит от природы соляного раствора. Измерения Фика в то время были многократно оспорены; однако более поздние исследования привели к результатам, подтвердившим правильность его закона. Иоганнисянц в 1877 г.³, исследуя диффузию растворов поваренной соли и воды, нашел, что, в общем, она соответствует закону Фика, хотя отдельные величины постоянных диффузии в его опытах колебались около некоторой средней величины.

„Experimentaluntersuchungen über Blasenbildung in kreisförmig cylindrischen Röhren“, Marburg 1868 и 1870), в которой исследуются воздушные пузыри в воде, алкоголе и т. д., а также ртутные капли на пластинках и в узких трубках, так как в этой работе явления поверхностного натяжения рассматриваются опять-таки с новой точки зрения.

¹ Один только Кант в своей посмертной работе „Vom Übergange von den metaphys. Anfangsgründen d. Naturw. zur Physik“ уже объяснял капиллярность на основе *кинетической* точки зрения: „Вода в стеклянных трубках, — говорит он, — при соприкосновении со стеклом становится еще более жидкой (а следовательно, и легче) вследствие сотрясения эфира, так как все сотрясения связаны с увеличением объема... Это сотрясение водяной пленки, стремящейся на поверхности стянуться и принять сферическую форму, ослабляет притяжение между частицами самой воды и увеличивает ее соприкосновение с пустотой путем соприкосновения со стеклом, сотрясение которого больше сотрясения водяной пленки“ („Altpr. Monatsschr.“, XX, стр. 354; Krause, „Das nachgelass. Werk Imm. Kant's“, стр. 186). В этой работе Кант также утверждает, что в капиллярных трубках вода поднимается по трубке жидкости, прилипшей к стеклу: „Если однако отвлечься от смелости гипотезы, допускающей существование такой действующей на расстоянии силы, которая была бы равна тяжести, то эта сила все-таки была бы в состоянии поднять в волосных трубках водяной столб, но не водяной газ. Ибо если внутренность стеклянной трубки была однажды (путем всасывания) достаточно высоко смочена, то вода уже не висит более на сухом стеклянном кольце, расположенном над нею, а на воде, смачивающей трубку изнутри“ („Altpr. Monatsschr.“, XX, стр. 424; Krause, „Das nachgel. W. I. Kant's“ стр. 187).

² „Pogg. Ann.“, XCIV, стр. 59, 1855. — А. Fick (родился в 1829 г.) — профессор медицинского факультета в Вюрцбурге.

³ „Wied. Ann.“, II, стр. 24, 1877.

278 МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ДВИЖЕНИЯ В ЖИДКОСТЯХ

В 1878 г. опыты Г. Ф. Вебера¹ также подтвердили элементарный закон диффузии Фика; однако, согласно его опытам, этот закон требует в одном пункте небольшой поправки, которая, впрочем, необходима и для закона Фурье. А именно, величина диффузии соляных растворов постепенно убывает с концентрацией, совершенно так же, как внутренняя теплопроводность медленно понижается с понижением температуры, тогда как согласно приведенному закону обе эти величины должны оставаться постоянными. Если уже эта аналогия указывала на то, что в основе диффузии жидкостей, как и газов, должны лежать внутренние движения, то присоединившиеся сюда другие факты еще более ясно указывали на зависимость этих явлений от молекулярных движений. Шумайстер², подтвердив отмеченный уже Г. Вебером в указанной выше работе факт, что диффузия с повышением температуры усиливается, установил, кроме того, что диффузия идет параллельно *коэффициенту внутреннего трения*, а может быть и *величине электропроводности рассматриваемой жидкости*. Наконец, — и это было всего важнее, — было установлено, что для возникновения диффузии нет никакой необходимости в соприкосновении разнородных жидкостей с их различными силами прилипания и сцепления и что эти явления имеют место в одной и той же жидкости при различных состояниях ее частей, например при *различных температурах*. «Так как диффузия происходит и при самых ничтожных различиях жидкостей, то отсюда, как говорит Леман³, заключают, что она возможна и тогда, когда нет совершенно никаких различий, т. е. когда речь идет только о частях одной и той же жидкости. Следовательно, в каждой жидкости должны постоянно происходить внутренние незаметные для нас течения».

Некоторое время даже думали, что *свободные движения внутри жидкости* или даже *движения ее молекул* доступны для непосредственного нашего наблюдения. Известный ботаник Роберт Броун в 1827 г.⁴, при помощи сильно увеличивающего микроскопа, заметил в воде с взвешенными в ней мелкими пылинками твердого тела своеобразные, очень неправильные колебательные движения, которые после этого многократно наблюдались другими лицами и были описаны под названием броуновских молекулярных движений. Вскоре затем Мунке высказал предположение⁵, что причиной этих движений являются проходящие через жидкость световые и тепловые лучи. Но Винер⁶ в 1863 г. до-

¹ „Vierteljahrsschr. d. naturf. Gesellsch. in Zürich“, XXIII, стр. 325, 1878.

² „Wiener Sitzungsber.“, LXXIX, стр. 603, 1879. Согласно Шумайстеру положение Вебера, что постоянная диффузии убывает с концентрацией, не имеет общей силы. В большинстве случаев, по-видимому, даже имеет место обратное явление.

³ O. Lehmann, Molecularphysik, I, стр. 264, Leipzig 1888. К сожалению, к моменту появления работы Лемана наша книга находилась уже в такой стадии, что мы этой работы не могли использовать в такой степени, в какой нам это представлялось желательным. — O. Lehmann — профессор Политехнической школы в Карлсруэ.

⁴ „Pogg. Ann.“, XIV, стр. 294, 1828. ⁵ Там же, XVI, стр. 160, 1829.

⁶ Там же, CXVIII, стр. 79, 1863. — Ludwig-Christian Wiener (родился в 1826 г.) — профессор Политехнической школы в Карлсруэ.

СКОРОСТЬ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКИХ ПОТОКОВ 279

казал несостоятельность всех объяснений, искавших причины этих явлений вне жидкости. Согласно Винеру особенность жидкостей заключается в том, что молекулы их совершают колебания, одинаково направленные с колебаниями заключенных в них атомов эфира, и эти-то сами по себе невидимые *молекулярные колебания* и вызывают видимые движения мельчайших частичек. Однако все последующие работы Экснера, фан-дер-Менсбругге¹ и других по своим выводам расходились и с этим объяснением и сводили причину броуновских движений к *течениям в жидкостях*, которые, во всяком случае, не тождественны непосредственно с молекулярными движениями. Подобный же результат дали исследования своеобразных *вихревых движений*, которые появляются на поверхности соприкосновения двух жидкостей, на поверхности мыльного пузыря, на маленьких кусочках камфары, плавающей на воде, и т. д. — явлений, которые впервые более точно были исследованы Дютроше² в 1841 г. и Е. Г. Вебером³ в 1855 г. Работами фан-дер-Менсбругге⁴, Томлинсона и других было почти достоверно установлено, что эти явления происходят вследствие *растекания* жидкостей друг по другу, *испарения* и *диффузии* жидкостей⁵.

Однако сильнее, чем в статических явлениях проявлялось действие внутренних движений жидкостей в явлениях движения последних, и, прежде всего в том, что при всех движениях жидкостей все яснее выявлялось *внутреннее сопротивление*, возникновение и передача которого указывали на существование *внутреннего трения жидкостей*, совершенно аналогичного по своим законам внутреннему трению газов. Уже при измерении *скоростей течения* в реках и открытых каналах выяснилось, что эти скорости зависят как от высоты падения воды, так и от *сопротивления русла*, что вследствие этого скорости в отдельных точках поперечного сечения потока весьма различны и что изучение распределения этих скоростей составляет очень сложную

¹ Там же, CXXXVIII, стр. 323, 1869; CXLVI, стр. 623, 1872.

² „Comptes rendus“, XII, стр. 229, 126 и 598, 1841; „S. 1. cause des mouvements que présente le camphre placé à la surface de l'eau“.

³ „Pogg. Ann.“, XCIV, стр. 447, 1855: „Mikroskop. Beob. sehr gesetzmässiger Bewegungen, welche die Bildung von Niederschlägen harziger Körper aus Weingeist begleiten“.

⁴ „Pogg. Ann.“, CXLVI, стр. 623.

⁵ См. также О. Lehmann, Molecularphysik, I, стр. 264 и сл., Leipzig 1888. Течения внутри и на поверхности жидкостей, вызываемые изменениями температуры и внешними вращательными движениями, исследовал Вильгельм фон-Бецольд (профессор метеорологии в Берлине), применивший для этого интересный метод, с помощью которого эти течения можно было сделать видимыми; для этой цели он пускал на поверхность жидкости или внутрь ее капли окрашенных гектографических чернил („Wied. Ann.“, XXIV, стр. 27 и 569, 1885; XXXII, стр. 171, 1887). О. Рейнольдс („Nature“, XXX, стр. 88, 1884) выявляет внутренние движения в жидкостях, вводя в них краску полосами. Нередко встречающиеся разногласия между теоретической и экспериментальной гидродинамикой он в этой работе объясняет присутствием в жидкостях внутренних движений, которые не принимаются в расчет гидродинамикой. Больше того, он утверждает, что внутренние движения могут изменять и законы движения твердых тел; так, например, подвешенный на нити полый шар, с невидимым вращающимся внутри его тяжелым колесом, должен вести себя совершенно иначе, чем массивный шар, имеющий совершенно такой же внешний вид.

280 СКОРОСТЬ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКИХ ПОТОКОВ

задачу. Весьма многочисленные и тщательные измерения скоростей течения рек произвели в течение 1851—1861 гг. на р. Миссисипи по поручению американского конгресса А. Гемфрейс и Л. Аббот¹. Своими измерениями они подтвердили много раз уже высказанное положение, что скорости всех точек, расположенных по отвесу в глубине реки, образуют по своим размерам *параболу* и что наибольшая скорость приходится не на поверхность реки, а довольно глубоко под нею (в Миссисипи на 0,317 глубины реки). Из этих измерений, равно как и из прежних опытов, на верхнем Рейне, на Сене, на бургундском канале и др. Гаген² вывел формулу для средней скорости v течения $v = 2,425 \sqrt{t} \sqrt[6]{a}$ м, где a обозначает относительное падение, а t — величину поверхности поперечного сечения потока, разделенную на периметр русла. При этом, однако, оказалось, что отдельные скорости в русле настолько сильно зависят от *сопротивлений трения* не только на *стенках*, но и на *поверхности*, а сверх того также от *неправильностей русла, расширений, сужений, изменений его направления* и т. д., что средняя скорость в действительности может быть определена только путем точных измерений многих отдельных скоростей. В соответствии с этим Греве³ при измерениях, произведенных им в 1877 г. по поручению правительства на Одере и Варте, установил, что отношения скоростей частичек воды на отдельных вертикальных линиях, равно как на целых поперечных сечениях и их частях, очень изменчивы; что для уменьшения скорости по вертикальным линиям от поверхности воды до дна реки нельзя вывести никакого закона; и что, таким образом, на основании данных о скоростях и верхних слоях воды нельзя даже и приблизительно судить о скоростях в нижних и средних слоях. Различия в скоростях частиц текущих вод приводят нас, прежде всего к двум категориям причин: во-первых, к *изменению направления движения* отдельных частиц, обусловливаемому изменениями сечения потока, расширениями и сужениями речного русла, отклонениями от прямой линии и т. д.; во-вторых, к *непосредственному уменьшению скорости*, вызываемому трением текущих вод о твердые окружающие предметы. Изучением действия первого рода причин очень усердно и плодотворно занимался Вейсбах⁴, собравший в 1855 г. в своем главном труде «Die Experimentalhydraulik, eine Anleitung zur

¹ „Theorie und Bewegung des Wassers in Flüssen und Canälen nach dem Berichte Humphreys-Abbot's" von Grebenau, München 1867 („Report upon the Physics and Hydraulics of the Mississippi River", составленный группой Humphreys-Abbot, появился в 1861 г.).

² „Über die Bewegung des Wassers in Strömen", „Abhandl. der Berliner Akademie", 1868.

³ „Civilingenieur", XXV, стр. 173, 1879; „Revue der Fortschr. d. Naturw. v. Klein", IX, стр. 28, 1881.

⁴ Julius Weisbach (1806—1871) — профессор горной академии в Фрейберге. В названном выше сочинении Вейсбах разбирает подробно также и явления истечения и описывает названный по его имени аппарат для истечения, который он, впрочем, описал еще раньше в 1848 г. в журнале „Polytechn. Centralblatt". К законам фонтанов он вернулся в 1861 г. в очень интересной работе („Dingler's Journ." CLXI, стр. 402). Для отношения между высотой давления h и высотой подня-

ВЯЗКОСТЬ ЖИДКОСТЕЙ 281

Ausführung hydraulischer Versuche im Kleinen», Freiberg 1855 («Экспериментальная гидравлика, руководство по проведению гидравлических опытов в малом масштабе»), результаты своих долговременных исследований. Однако теоретически более важной была причина второго-рода, так как она непосредственно приводила к более глубокому пониманию *природы* жидкостей. Раньше сущность жидкости и характерные признаки, отличающие ее от других агрегатных состояний, усматривали в том, что две частицы ее, правда, производят друг на друга некоторое притяжение, или вызывают сцепление по направлению соединяющей их прямой, но зато они могут быть с абсолютной легкостью перемещены друг относительно друга по направлению, перпендикулярному к этой линии. Хотя согласно этому представлению и было возможно некоторое внешнее трение жидкости о стенки канала, в силу прилипания, но действия трения, строго говоря, не могли распространиться за пределы этого прилипания. Однако фактически наблюдаемая передача задержки течения от стенок вглубь жидкости указывала на то, что допущенная абсолютная подвижность частиц в жидкостях не может иметь места и что здесь скорее должна существовать какая-нибудь сила, препятствующая такому перемещению, под действием которой при различной скорости движения двух соседних слоев, более быстрый из них замедляется, а более медленный ускоряется. Силу, вызывающую явление внутреннего трения жидкостей, назвали *вязкостью* жидкостей. При измерении вязкости по тем сопротивлениям, которые она вызывает при течении жидкостей, стали для равномерности действий применять закрытые трубки, а для того чтобы по возможности исключить всякие нарушения правильности этих явлений, вследствие изменения направления движения частиц и их толчков, стали брать капиллярные трубки. Такого рода исследования над движением воды в узких цилиндрических трубках Гаген произвел уже в 1839 г. ¹. Очень обстоятельные и тщательные *измерения скоростей в капиллярных трубках* произвел также Пуазелль в течение 1840—1847 гг. ². Он нашел, что объемы жидкостей, про-

тия s Мариотт дал формулу: $\frac{h}{s} = 1 + \frac{s}{300}$ (парижских фут.), а д'Обюиссон — $s/h = 1 - 0,1h$ (m); но обе эти формулы применимы лишь к малым высотам давления.

Вейсбах дал формулу: $s = \frac{h}{a + \beta h + \gamma h^2}$, и путем наблюдений, при которых высота струи измерялась с помощью теодолита, а давление манометром, нашел, что при круглом вытечном отверстии диаметром в 7,1 мм

$s = \frac{h}{1 + 0,010348h + 0,0011851h^2}$. С увеличением вытечного отверстия увеличивается и высота выбрасываемой струи.

¹ „Pogg. Ann.“ XLVI, стр. 423, 1839.

² „Recherches exp. s. le mouv. des liquides dans les tubes de très-petites diamètres“, „Mém. Sav. étrang.“, IX, стр. 433, 1846; в извлечении еще в „Ann. de chim. et de phys.“ (3), VII, стр. 50, 1843; также в „Pogg. Ann.“, LVIII, стр. 424, 1843. „S. le mouv. des liquides de nature différente dans les tubes de très-petites

282 ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ В ЖИДКОСТЯХ

ходящих за определенное время через капиллярную трубку, выражаются формулой $Q=kHD^4/L$, где H обозначает высоту давления, D — диаметр, L — длину трубки и k — некоторый коэффициент, величина которого зависит от природы жидкости и от ее температуры. Начиная с шестидесятых годов интерес, сосредоточился, главным образом, на определении этого коэффициента в различных жидкостях, который назвали *постоянной* внутреннего трения. Гагенбах, пришедший в 1860 г.¹ к формуле, вполне соответствующей формуле Пуазелля, при этом прямо определил *вязкость* (или постоянную трения) жидкости как силу, необходимую для перемещения со скоростью, равной единице, слоя жидкости толщиной в одну молекулу и единицы поверхности, около другого слоя — на расстояние двух молекул. При этом он сделал допущение, что трение пропорционально, величине трущейся поверхности и относительной скорости трущихся слоев², но, вопреки ожиданию, нашел, что трение не зависит от давления, и установил значительное *понижение его с температурой*. В остальном из его исследований выяснилось, что трение зависит только от природы жидкости, а не от свойства стенок трубки. Таким образом, трение внутри жидкостей должно совершенно перевешивать внешнее трение между жидкостью и стенкой; а это последнее обстоятельство можно было понять только при допущении столь полного *прилипания ближайшего слоя жидкости к стенкам трубки*, что трение происходит уже не между стенкой и жидкостью, а между слоями самой жидкости. С этими выводами в основном совпали и выводы, полученные О. Мейером³ около

diam.", „Ann. de chim. et de phys." (3), XXI, стр. 76, 1847. О своих опытах Пуазелль помещал сообщения в „Comptes rendus", начиная с 1840 г. („Comptes rendus", XI, стр. 961 и 1041, 1840; XII, стр. 112). — Jean Leon Poiseuille (1799—1869) — практиковавший парижский врач.

¹ „Bestimmung der Zähigkeit einer Flüssigkeit durch den Ausfluss aus Röhren", „Pogg. Ann.", CIX, стр. 385, 1860.

² Смотри также по этому вопросу выше в отделе о трении газов (стр. 214) Гагенбах говорит следующее о пропорциональности между внутренним трением и скоростью: „Это допущение оправдывается указанием на то, что при двойной скорости частица должна отрываться от вдвое большего числа частиц; но лучше всего правильность этого допущения доказывается тем, что с помощью его получаются формулы, совпадающие с данными опыта" („Pogg. Ann.", CIX, стр. 392). Эта пропорциональность между скоростью и внутренним трением существенно отличает последнее от трения при скольжении твердых тел, которое оказывается независимым от скорости, а при очень больших скоростях даже уменьшается с увеличением скорости. Варбург и Бабо („Wied. Ann.", II, стр. 406, 1877) отсюда сделали тот вывод, что это внешнее трение в большей своей части происходит, вероятно, не под влиянием молекулярных притяжений и не под действием слоев газов или жидкостей, сгущенных на поверхностях, но скорее вызывается неровностями поверхностей и их упругостью.

³ „Über die Reibung der Flüssigkeiten", „Pogg. Ann.". CXIII, стр. 55, 193 и 383 (опытные результаты) и „Crelle's Journal", LIX, стр. 229 (математические выводы). Большая часть этой работы Мейера была представлена еще в конце 1857 г. в Кенигсбергский университет для соискания премии, которой она и была удостоена в январе 1853 г. (в двойном размере). Идеи Мейера о трении и о коэффициенте трения были уже изложены выше в теории трения газов. Благодаря тому, что Мейер постоянно сравнивал трение жидкостей с трением

КОЭФФИЦИЕНТ СКОЛЬЖЕНИЯ. ВНЕШНЕЕ ТРЕНИЕ 283

того же времени для внутреннего трения жидкостей; его опыты были проведены по другому методу, который он вскоре применил и к измерению трения газов и который был нами уже выше описан. При помощи диска, вращающегося в воде, он нашел для внутреннего трения величины сходные, хотя и несколько бо́льшие величин, полученных из опытов Пуазелля, доказал, что внутреннее трение в воде и соляных растворах меньше, чем в масле, и подтвердил, что внутреннее трение пропорционально поверхности и относительной скорости, что оно значительно уменьшается с температурой и что при движении кружков тоже не наблюдалось такого внешнего трения, которое бы замедляло движение. При всем том в других случаях, конечно, могло проявиться и действие внешнего трения; действительно, опыты Петровского, произведенные им в 1860 г.¹, по предложению Гельмгольца, показали, что при особых обстоятельствах может происходить частичное скольжение жидкости по твердому телу. В предположении существования некоторого внешнего трения Гельмголец вывел для количества жидкости, вытекающей из стеклянных трубок, формулу:

$$Q = \frac{\pi (p_0 - p_1)}{8k^2L} (R^4 + \lambda R^3),$$

где p_0 обозначает давление в начале трубки, p_1 — в конце ее, R — радиус, L — длину трубки, k^2 — коэффициент внутреннего трения и, наконец, λ — коэффициент скольжения², т. е. некоторую постоянную, зависящую от природы стенки и жидкости, и противоположную трению. Опыты заключались в том, что сосуд правильной формы, например полый шар, наполненный жидкостью, приводили во вращение около его оси и затем наблюдали уменьшение величины его размахов. Из этих опытов выяснилось, что для движения воды в стеклянных сосудах с гладкими хорошо вычищенными поверхностями коэффициент скольжения можно положить равным нулю, т. е. что соприкасающийся со стенкой слой воды крепко прилипает к сосуду; что подобное же явление имеет место для алкоголя и эфира в металлических сосудах с полированными и позолоченными стенками; но что вода в таких сосудах проявляет *несомненное внешнее трение* и вместе с тем скольжение по поверхности. Эта тема потом разрабатывалась еще несколько раз. Варбург в 1870 г.³ нашел, что и для жидкостей, которые не смачи-

газов, объяснение первого явления получило у него более кинетическую окраску. Мейер особо подчеркивает, что при внутреннем трении происходит передача движения от движущегося слоя к соседнему неподвижному; Гагенбах же обращается более непосредственно к причине таких передач, т. е. к вязкости. По вопросу о внутреннем трении жидкостей при протекании по узким трубкам в 1861 г. появилась еще статья Якобсона под заглавием »Zur Einleitung in die Hämodynamik" в „Archiv für Anatomie", стр. 304, 1861.

¹ „Sitzungsber. d. Wiener Akad., mathem. naturw. Klasse", XL, стр. 607; *Helmholtz*, Wissenschaftl. Abhandlungen, I, стр. 172.

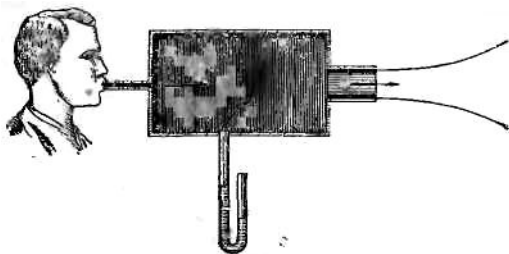
² По Мейеру („Kinet. Theorie der Gase", стр. 147) коэффициент скольжения равен отношению коэффициентов внутреннего и внешнего трения.

³ „Pogg. Ann.", CXL, стр. 367, 1867: „Über den Ausfluss des Quecksilbers aus gläsernen Capillarröhren". С другой стороны, Кундт и Варбург доказали для

284 ФОРМА СТРУЙ В ТЕКУЩИХ ЖИДКОСТЯХ

вают стенок сосудов, например для ртути в стеклянных капиллярных трубках, количество вытекающей жидкости может быть представлено формулой:

$Q = \frac{\pi (p_0 - p_1)}{8k^2L} R^4$, что, следовательно, и здесь можно допустить прилипание жидкости к стенкам сосуда. Однако Унвин в 1880 г. ¹ из своих опытов над вращающимися в воде металлическими дисками с поверхностями различной шероховатости нашел, что сопротивления в высокой степени зависят от свойства поверхностей, и вообще пришел к выводам, которые очень мало согласовались с полученными раньше. Отчасти это могло происходить вследствие того, что он производил свои опыты с гораздо большими скоростями, чем его предшественники, и что явления усложнялись у него такими побочными эффектами, как внутренние толчки, которые вызывали потери силы. Трение, в особенности внутреннее, должно влиять на все явления движения жидкостей; поэтому точное изучение этого влияния во всех отдельных случаях представляется особенно важным для гидродинамики. Но так как исследование влияния внутреннего трения предполагает наличие данных о различии скоростей и их распределении внутри жидкостей, а эти движения сами по себе мало исследованы и, во всяком случае, едва известны, то изыскания подобного рода будут всегда особенно трудными и кропотливыми, и действительно, исследование этих процессов до сих пор дало еще мало результатов. Правда, П. Дюбуа-Реймон уже в 1854 г. ² усердно занимался изучением *формы струй* в текущих жидкостях, пользуясь при этом вязкостью для объяснения явлений. А именно, он сделал допущение, что частицы жидкости под действием свойственных ей сил удерживаются на известном расстоянии друг от друга, так что сама жидкость по своей природе оказывает сопротивление движению в ней частицы по всем направлениям, и что это сопротивление зависит от положения частицы по отношению к стенке сосуда, по отношению к поверхности жидкости и от различной вязкости жидкости по различным направлениям. Из этих предпосылок следовало, что *поток в жидкости всегда отклоняется в сторону наибольшего сопротивления разрыву*, а отсюда



Черт. 9.

газов, что коэффициент скольжения по твердой стенке у них должен иметь величину, несколько отличную от нуля („Pogg. Ann.", CLV, стр. 337 и 525; CLIX, стр. 399). — E. Warburg (родился в 1846 г.) — профессор физики в Фрейбурге.

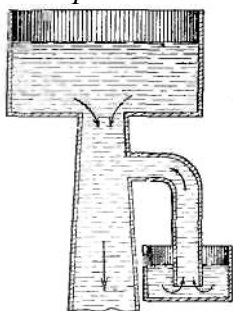
¹ „Proc. of the Roy. Soc.", XXXI, стр. 54, 1880. — W. C. Unwin — профессор гидравлики в Индийской королевской инженерной школе.

² „Unters. über. d. Flüssigkeiten, über deren innere Strömungserscheinungen" и т. д., Berlin 1854.

ВСАСЫВАЮЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ ЖИДКИХ ПОТОКОВ 285

для потоков призматического поперечного сечения он получил следующие законы: при своем движении потоки расширяются всегда таким образом, что площадь их поперечного сечения увеличивается; скорость течения от оси призмы по направлению к поверхности уменьшается; два потока, сходящиеся под каким-нибудь углом друг с другом или же расходящиеся, всегда обращаются друг к другу своей выпуклой стороной; а потоки, из которых один движется по направлению к вершине угла, а другой от нее удаляется, обращаются друг к другу вогнутой стороной; стоячая вода ведет себя как вода, движущаяся в противоположном направлении, откуда следует, что во всех тех случаях, когда русло испытывает внезапное расширение или когда поток вступает в стоячую воду, должен образоваться водоворот или вихрь.

Однако более общий интерес в новейшее время возбудили только действия водяных и воздушных струй на окружающие их неподвижные воздушные и водяные слои, а также основанные на этих явлениях насосы. После Генри Джемса¹ сначала Гауксби², а потом Лесли на опыте доказали, что давление на дно сосуда, наполненного одним воздухом, уменьшается, если через него продувать горизонтальную струю воздуха, выходящего через более широкое отверстие, чем, то, в которое он входит в сосуд. Аналогично этому Бернулли³ и Вентури показали, что поток воды, идущий через конически расширяющуюся трубку, производит на воду в проведенной сбоку трубке всасывающее действие. Последний из них в 1797 г.⁴ особо исследовал боковую передачу движений потоками в жидкостях. Он также заметил, что струя воды, ударяющаяся о неподвижную водную поверхность, приносит с собою в воду много воздуха, и объяснил это прилипание воздуха к водяной струе. Эти явления позднее многократно исследовались; впервые в более связном виде они были исследованы в 1850 г. Магнусом. Последний⁵ установил, что по сторонам потока, проходящего через жидкость, *давление всегда меньше того, которое было бы, если бы движение потока прекратилось. Захватывание воздуха* водяной струей Магнус приписывал в большей степени *механическому увлечению* его, вызываемому прерывным характером водяных струй, чем *непосредственному прилипанию* к ним воздуха. По существу так же, а именно



Черт. 10.

¹ „Edinb. Phil. Trans.", XX, стр. 379, 1853 (доложено 15 марта 1852 г.). Джемс поясняет свое положение двумя рисунками, приведенными на этой странице.

² „An experiment to show the cause of the descent of the mercury in the barometer in a storm", „Phil. Trans." 1704.

³ *D. Bernoulli*, Hydrodynamica, стр. 276, Strassburg 1738. Второй из приведенных на этой странице чертежей соответствует черт. 81 табл. XII „Hydrodynamica".

⁴ „Mém. s. la communication latérale du mouvement dans les fluides, appliqué à l'explication des différentes phénomènes hydrauliques", „Bull. de la Soc. philomath.", 1797.

⁵ „Pogg. Ann.", LXXX, стр. 1, 1850; XCV, стр. 1, 1856; CVI, стр. 1, 1859.

286 ТРИ АГРЕГАТНЫХ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

неправильной формой струи, объяснил это явление и Гиндаль¹, хотя по некоторым частным вопросам он и был не согласен с Магнусом. Для пояснения данного явления он, между прочим, указал на тот факт, что потоки дробы или нити с узлами, пропущенные через жидкость, увлекают с собою части жидкости, через которую они проходят. Поэтому вплоть до новейшего времени все эти процессы описывались, как явления так называемого *динамического давления*; однако причину понижения давления вокруг движущегося тела пока не искали и несомненную связь этих явлений с явлениями внутреннего и внешнего трения жидкостей ближе не исследовали. Зато тем усерднее пытались практически использовать эти силы. В 1859 г. Жиффар построил на принципе динамического давления свой инжектор или паровой насос. Около этого же времени Шимпер изготовил свой *насос*, действующий путем вдувания, который позднее вошел во всеобщее употребление под различными названиями (пульверизатора, охладителя и т. д.). В 1865 г. Шпренгель описал воздушный *всасывающий насос* (ртутный насос), а в 1869 г. за ним последовал Бунзен с устроенным по тому же принципу *водяным воздушным насосом*, который вскоре стал изготовляться в различных вариациях.

Трение жидкостей имеет только то общее с трением твердых тел, что оба они представляют некоторое сопротивление, препятствующее движению соприкасающихся веществ. В остальном законы трения жидкостей, а именно — независимость трения от давления, пропорциональность его скорости и т. д., скорее совпадали с законами трения газов, чем твердых тел. После того как кинетическая теория газов добилась всеобщего признания, было естественно стремиться и к более кинетической разработке вопроса о трении жидкостей. Наблюдения взаимного трения между твердыми, жидкими и газообразными телами в еще большей степени побуждали к тому, чтобы при механическом объяснении их отказаться от принятого раньше строгого обособления этих трех форм материи и установить между ними живую связь. Вообще к такому взгляду на агрегатные состояния материи приводили все упомянутые выше работы по молекулярной физике. Из них все больше и больше выяснялось, что эти состояния не представляют собою чего-либо абсолютно различного, а только известные модификации, отличающиеся лишь по степени. *Раньше твердое, жидкое и газообразное состояния рассматривались как некоторые первичные формы материи, отделенные друг от друга непроходимыми пропастями, и натурфилософы, как, например, Кант, в своих «Метафизических основаниях науки о природе», всегда считали одной из главных своих задач философски разрешить заданную физикам загадку о возможности существования материи в трех видах. Теперь же оказалось, что этот троякий вид существования есть лишь троякая форма явлений, которые, будучи обусловлены больше взаимодействием веществ, чем их внутреннюю природою, могут быть переведены одна в другую постепенно, без всяких разделяющих их границ.* Одновременно с этим воз-

¹ Pogg. Ann.", LXXXII, стр. 294, 1851.

МЕХАНИКА ТЕПЛОВЫХ ДВИЖЕНИЙ 287

ника новая задача установить для всех веществ возможность существования их во всех трех состояниях и точно исследовать условия их перехода из одного состояния в другое. Благодаря такой постановке вопроса выяснилось, что *тепловые* молекулярные движения, которые преимущественно обуславливают агрегатное состояние тел, имеют основное значение не только для узкой области учения о теплоте, но также и для наших воззрений на строение тел, и что точка зрения на теплоту, как на некоторый род движения, со своей стороны тоже непосредственно приводит к кинетическому представлению о материи.

МЕХАНИКА ТЕПЛОВЫХ ДВИЖЕНИЙ (приблизительно от 1860 до 1880 г.). Каньяр-Латур¹ сделал в 1822 г. интересное наблюдение, что эфир, алкоголь и вода в герметически закрытых трубках при сильном нагревании, по-видимому, полностью превращаются в пар, несмотря на то, что эти жидкости могли при этом увеличить свой объем только вдвое и самое большее вчетверо, по сравнению с первоначальным объемом. Вследствие сильного разъедания стенок стеклянных трубок горячими жидкостями и большой опасности взрыва Каньяр-Латур не мог довести до конца своих опытов, которые долгое время считались неточными. Впервые важное значение этих опытов показал Т. Эндрюс, который в шестидесятых годах обратил эту проблему и поставил перед собою вопрос, каким образом газ, сведенный до самого незначительного объема, может все-таки сохранить свое газообразное состояние. При этом он пришел² к выводам, которые соответствовали упомянутым выше опытам Каньяр-Латура, но при этом оказались более плодотворными и поучительными. «При частичном сжижении углекислоты, — так описывает он свои тогдашние опыты, — при помощи одного давления и при одновременном постепенном повышении температуры до 88° F, поверхность раздела между жидкостью и газом становилась все слабее, теряла свою кривизну и, наконец, совсем исчезла. В это время все пространство было занято однородною жидкостью, в которой при внезапном уменьшении давления, или при некотором понижении температуры, появлялись свое-

¹ „Ann. de chim. et de phys.“ (2), XXI, стр. 127 и 178; XXII, стр. 140, 1822 и 1823.

² Эти опыты были впервые опубликованы на основании письма Эндрюса в третьем издании Miller's „Chemical Physics“. Эндрюс начал свои опыты уже в 1861 г. и тогда же установил, что кислород, водород, азот, углекислота и окись азота, будучи доведены общим действием давления и охлаждения до $\frac{1}{500}$ своего первоначального объема, не переходят в жидкое состояние („Report of the Brit. Assoc.“, 1861; „Transact. of the Sect.“, стр. 76). Некоторые физики еще до Эндрюса вновь обратились к опытам Каньяр-Латура. Фарадей в упомянутой уже выше статье 1845 г. „On the liquefaction and solidification“ говорит: „Я склонен думать, что около 90° (F) углекислота приходит в каньяр-латуровское состояние“. Вольф и Дрион в конце пятидесятых годов попытались определить для некоторых жидкостей температуры, при которых они могли бы перейти в состояние Каньяр-Латура (Ladenburg, „Gesch. d. Chemie“, стр. 341). Д. Менделеев же в 1861 г. охарактеризовал это состояние, как состояние, при котором сцепление и теплота испарения становятся равными нулю, и дал соответствующей температуре особое название *абсолютной температуры кипения* („Ann. d. Chem. und Pharm.“, CXIX, стр. 1).

288 НЕПРЕРЫВНОСТЬ АГРЕГАТНЫХ СОСТОЯНИЙ ВЕЩЕСТВА

образного вида полосы, движущиеся и струящиеся по всей массе вещества. При температурах выше 88° нельзя было достигнуть видимого сжижения углекислоты, в жидкость, или разделения ее на два агрегатно различных состояния, даже когда давление достигало от 300 до 400 *ат*. Азотистая кислота дала аналогичные результаты»¹.

Шесть лет спустя, в 1869 г.², Эндрюс представил более точные наблюдения и дальнейшие объяснения этого своеобразного свойства газа. Взятые для исследования газы он помещал в очень крепкие запаянные сверху стеклянные капиллярные трубки и определенный объем газа запирали каплей ртути³. Эти трубки затем помещались открытым концом в наполненный доверху водой и герметически закрытый сосуд, в котором можно было повышать давление до 400 *ат* путем ввинчивания длинного точно пригнанного стального винта. Капиллярные трубки с подлежащим сгущению газом поддерживались при постоянной температуре при помощи струи воды, а объемы газов, соответствовавшие этим температурам и постепенно возрастающему давлению, точно измерялись. Температуры отдельных рядов опытов лежали в пределах от $13,1$ и $48^{\circ},1$ С; полученные при этом результаты он для лучшего обозрения сопоставил в таблицах и иллюстрировал кривыми, абсциссы которых были пропорциональны давлениям, а ординаты — соответствующим объемам. Рассмотрение этих таблиц или кривых⁴ показывает, что при низком давлении даже поддающийся сгущению газ, как углекислота, следует, подобно идеальному газу, закону Мариотта; но что, начиная с известного давления, газ может очень значительно уменьшаться в объеме без соответствующего заметного увеличения давления. Наступление такого явления указывает, что в этом состоянии газообразная углекислота уже сгущается и существует частью как газ, частью как жидкость. С окончанием сгущения давление начинает необычайно сильно возрастать даже при небольшом изменении объема. Если, далее, сравнить между собою несколько кривых одного и того же газа для различных температур, можно легко убедиться, что то состояние, при котором жидкость и газ существуют совместно, т. е. при котором кривая почти параллельна оси ординат, — с повышением температуры наступает при более высоком давлении и прекращается при большем объеме, чем прежде, т. е. что это состояние теперь продолжается меньше времени, чем прежде. Начиная с некоторой определенной температуры, особой для каждого газа, например для углекислоты начиная с $31^{\circ},1$, такое

¹ „Pogg. Ann.“, доп. том. V, стр. 65.

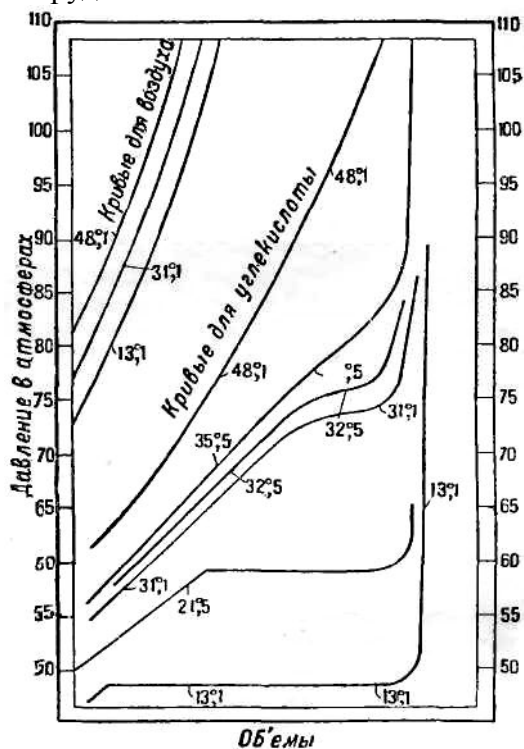
² „Phil. Trans.“, стр. 575, 1869; „Pogg. Ann.“, доп. том. V, стр. 64, 1871 (имеется русский перевод этой работы, а также работы от 1876 г.: Т. Эндрюс, О непрерывности газообразного и жидкого состояний вещества, ГТТИ, 1933—Ред.).

³ Для того чтобы наполнить капиллярные трубки чистой углекислотой и по возможности удалить оттуда атмосферный воздух, Эндрюс до запаивания трубок пропускал через них углекислый газ в продолжение 24 час; несмотря на это, в трубке всегда оставалось некоторое не поддававшееся устранению количество воздуха, составлявшее от $1/500$ до $1/1000$ всего объема углекислоты („Pogg. Ann.“, доп. том V, стр. 66).

⁴ Приведенный на стр. 289 чертеж представляет собою копию чертежа Эндрюса, помещенного в „Pogg. Ann.“, доп. том V (табл. II, черт. 9).

НЕПРЕРЫВНОСТЬ АГРЕГАТНЫХ СОСТОЯНИЙ ВЕЩЕСТВА 289

состояние совершенно исчезает. Повышение давления продолжается тогда непрерывно с уменьшением объема, газ от начала до конца следует приблизительно закону Мариотта и в капиллярной трубке незаметно и следов жидкости ¹. «Каково же состояние углекислоты, — спрашивает Эндрюс, — когда она при температурах выше 31°,1 переходит из газообразного состояния в объем жидкости, не проявляя во время этого процесса никакого признака наступившего сжижения? Остается ли она в газообразном состоянии или же она становится жидкой?.. Согласно правильному, по моему мнению, толкованию описанных опытов ответ на этот вопрос дается внутренними соотношениями, существующими между газообразным и жидким агрегатными состояниями. Обычное жидкое и обычное газообразное состояния являются, выражаясь кратко, только далеко отстоящими друг от друга видами одного и того же агрегатного состояния; они могут быть переведены одно в другое путем ряда столь постепенных переходов, что при этом нигде не наблюдается разрыва или нарушения непрерывности... При известных условиях температуры и давления углекислота находится в состоянии некоторого неустойчивого равновесия и внезапно, с развитием тепла, но без дополнительного изменения давления или температуры, переходит в объем, который при непрерывном процессе она может занять только в результате длинного окольного пути. При наступающем здесь внезапном изменении выявляется заметное различие в оптических и прочих физических свойствах углекислоты, сжатой до меньшего объема, и той, которая его (т. е. объема) еще не изменила; поэтому совсем нетрудно отличить



Черт. 11.

¹ Следовательно, вообще при низких температурах кривые давления являются не непрерывными и состоят из трех, прерывно переходящих друг в друга участков; при более высоких температурах они все больше приближаются к непрерывности и постепенно переходят в равностороннюю гиперболу, предоставляемую уравнением $pv=C$.

290 СЖИЖЕНИЕ ПОСТОЯННЫХ ГАЗОВ

жидкость от газа. Однако в других случаях такое различие невозможно... При $35^{\circ},5$ и 108 ат давления углекислота занимает среднее положение между газом и жидкостью, и у нас нет никаких веских оснований для того, чтобы приписать ей одно агрегатное состояние предпочтительно перед другим...

Описанные в настоящем сообщении свойства углекислоты принадлежат не только ей одной, они присущи всем вообще телам, которые могут быть получены в виде газа и жидкости. Окись азота, аммиак, серный эфир и сероуглерод, все они при известных давлениях и температурах дают *критические точки* и быстрые изменения объема со струистыми движениями, когда температура и давление изменяются вблизи этих точек...

Различие между газом и паром было до сих пор основано на совершенно произвольных принципах... Это различие обуславливалось тем несущественным обстоятельством, что точка кипения жидкости под обычным атмосферным давлением лежит выше или ниже обычной температуры окружающего воздуха... Мы можем теперь оказать: *пар есть газ при любой температуре ниже его критической точки*. Согласно этому определению пар может быть превращен в жидкость одним лишь давлением и может, следовательно, существовать в присутствии собственной жидкости, тогда как газ не может быть сжижен одним давлением, т. е. не может быть изменен давлением таким образом, чтобы жидкость можно было наблюдать отделенной от газа видимой поверхностью. Согласно этому определению углекислота ниже 31° будет паром, а выше 31° — газом». Эндрюс заканчивает свою статью следующими словами: «Остается разрешить еще гораздо более трудную проблему о возможной *непрерывности жидкого и твердого агрегатных состояний*; прекрасное открытие, сделанное несколько лет тому назад Джэмсом Томсоном о влиянии давления на температуру, при которой происходит плавление (отвердевание), подтвержденное экспериментально Уильямом Томсоном, указывает, мне кажется, то направление, в котором должно быть предпринято это исследование»¹.

В позднейшем продолжении² своих работ Эндрюс занялся преимущественной проверкой закона Дальтона. Подвергнув сильному сжатию смесь углекислоты и азота, он нашел, что мысль Дальтона, будто частицы различных газов друг с другом не взаимодействуют, неверна и что, например, критическая точка углекислоты, в случае прибавления к последней хотя бы только одной десятой доли объема воздуха или азота, понижается на несколько градусов. Таким образом закон Дальтона, равно как и законы Бойля-Мариотта и Дальтона-Гэ-Люссака, действителен только для несмешанных газов, когда последние находятся под слабым давлением и при температуре значительно выше критической точки. Что касается газов, которые до сих пор назывались постоянными, то о них Эндрюс в заключение утверждает, что критическая точка последних «вероятно, лежит гораздо ниже самых низких из полученных до сих пор температур» и что только поэтому их до сих пор не удалось превратить в жидкое состояние.

¹ „Pogg. Ann.", доп. том., V, стр. 82—87.

² „Proc. of the Royal Society", XXIII, стр. 514 и XXIV, стр. 455, 1871 и 1872.

СЖИЖЕНИЕ ПОСТОЯННЫХ ГАЗОВ 291

Следуя этому указанию, два физика, Калльете и Пикте, в конце 1877 г. одновременно добились сжижения постоянных газов. Калльете уже в 1870 г.¹ подвергал атмосферный воздух и водород давлению до 700 *at* и во всех случаях констатировал уменьшение отношения vp/v_1p_1 (соответствующего объемам и давлениям в начале и конце опытов). Для воздуха, при увеличении давления от 60 до 705 *at*, это отношение уменьшалось от 1,0131 до 0,6660; а для водорода, с повышением давления от 60 до 605 *at*, оно снижалось — от 0,9810 до 0,7580. В первой половине 1877 г. Калльете занялся устройством манометра для очень высокого давления, а также сжижением ацетилена и азотноватого ангидрида. 16 декабря 1877 г. в химической лаборатории *École normale supérieure*, в присутствии значительного числа ученых, он показал, что хотя кислород и окись углерода оставались еще газообразными при температуре — 29° и давлении в 300 *at*, однако при быстром расширении газа в приборе вследствие понижения температуры (до — 200°) появлялся туман, который можно было объяснить только переходом газа в твердое или жидкое состояние. Несколько позднее, 31 декабря того же года, Калльете удалось воспроизвести то же явление на азоте и водороде². Пикте первому удалось получить из постоянных газов некоторые устойчивые количества жидкости³. Он охлаждал компрессор своего прибора путем испарения углекислоты до —140°. С помощью паровой машины в 15 л. с. он подвергал кислород давлению в 320 *at*. Тогда при открытии крана прибора для сгущения газа кислород из него вырывался с такою стремительностью, что часть его, охлаждаясь вследствие испарения, обращалась в жидкость и при наклонении прибора выбрасывалась сильной струей. При одном опыте, произведенном 22 декабря 1877 г., было таким путем получено несколько кубических сантиметров жидкого кислорода. Подобным же образом Пикте получил и водород в жидком состоянии. В более значительных количествах так называемые постоянные газы были впервые сгущены в 1882 г. С. Вроблевским и К. Ольшевским⁴. При кипении чистого кислорода Вроблевский получил температуру —184°, при кипении воздуха — 192,2°, азота —193,1°, окиси углерода —193°; путем испарения тех же газов в пустоте он достиг тем-

¹ „Comptes rendus", LXX, стр. 1131, 1870. На основании этих опытов ван-дер-Ваальс еще до 1873 г. вычислил критическую температуру кислорода в — 158°, — значительно выше действительной. („Über den Übergangszustand zwischen Gas und Flüssigkeit", Leyden 1873, по „Beiblätter zu Pogg. Ann.", I, стр. 18).

² „De la condensation de l'oxygene et de l'oxyde de carbone", „Comptes rendus", LXXXV, стр. 1213. „Sur la condensation des gaz réputés incoércibles", там же, стр. 1270. См. также „Ann. de chim. et de phys." (5), XV, стр. 132, 1878.

³ „Expériences sur la liquéfaction de l'oxygene", „Comptes rendus", LXXXV, стр. 1214 и 1276. „Mémoire sur la liquéfaction de l'oxygène, la liquéfaction et la solidification de l'hydrogène et sur les théories de changement de l'état des corps", „Archives des sciences physiques et naturelles", LXI, стр. 16, 1878. Raoul Pictet — физик в Женеве.

⁴ „Sur la liquéfaction de l'oxygène et de l'azote", „Comptes rendus", XCVI, стр. 1140 и 1225, 1883; также „Wied. Ann.", XX, стр. 243, 1883. „Sur la liquéfaction de l'hydrogène", „Comptes rendus", XCVIII, стр. 304 и 365, 1884.

292 ТЕОРИИ АГРЕГАТНЫХ СОСТОЯНИЙ ВЕЩЕСТВА

ператур на несколько градусов ниже -200°C ¹. Аналогичные, лишь мало отличающиеся результаты получил и Ольшевский²; поэтому оба эти ученые рекомендовали кислород в качестве действительного средства для охлаждения. Наиболее пригодными для определения столь низких температур оказались водородные термометры, критическая точка которых лежит, по-видимому, ниже всего; Ольшевский нашел, что даже при температуре в -220°C ошибка таких термометров не может превысить 1°C ³. Этот же ученый успешно занялся определением физических констант новых жидкостей. Плотность жидкого кислорода, критическая точка которого лежит при $-118,8$ оказалась равной 1,124 (при $-181,4$), а плотность жидкого азота (критическая температура -146°) — равной 0,885 (при $-194,4$)⁴.

Эндрюс назвал критической точкой газа ту температуру, при которой жидкость уже не может больше существовать совместно с собственным паром. Другие физики попытались найти физические обоснования для этого явления. Ганней⁵ высказал мысль, что единственно надежным *отличительным признаком жидкости от газа является перевес силы сцепления над живою силою молекул* или наличие у жидкости поверхностного натяжения. Следовательно, критическая точка жидкости — это та температура, при которой исчезает сцепление, или поверхностное натяжение, или капиллярность. Тот факт, что критическая точка зависит не от давления, а только от температуры, показывает, что газообразное состояние материи зависит от *средней скорости молекул*, а не от длины свободного их пути, и что определенная живая сила молекул способна независимо от давления помешать всякому устойчивому, твердому группообразованию. В соответствии с этим Ганней различает четыре различных агрегатных состояния: 1) *газообразное*, простирающееся от наивысшей температуры до некоторой изотермы, проходящей через критическую точку, при котором значительная живая сила молекул препятствует действию сцепления; 2) *парообразное* и 3) *жидкое*; оба они простираются от упомянутой выше изотермы до некоторой определенной температуры, или же до абсолютного нуля; между собою они различаются отношением длины молекулярного пути к сцеплению, и, наконец, 4) *твердое* состояние".

¹ „Sur la temperature qu'on obtient á l'aide de l'oxygène bouillant", „Comptes rendus", XCVII, стр. 1563 и XCVIII, стр. 982. С. Вроблевский — профессор физики в Кракове, умерший там же 17 апреля 1888 г. на 40-м году жизни.

² „Temperature de solidification de l'azote et du protoxyde de carbone, relation entre la temperature et la pression de l'oxygène liquide", „Comptes rendus", С, стр. 350, 1885 г. Уменьшая давление над затвердевшим азотом до 4 мм, Ольшевский достиг наиболее низкой температуры в -225°C .

³ „Vergleich von Gasthermometern bei niederen Temperaturen", „Sitzungsber. der math.-naturw. Cl. d. Krakauer Akad. d. Wiss.", XIV, стр. 283, 1886; „Beiblätter zu Pogg. Ann.", X, стр. 679.

⁴ „Wied. Ann.". XXXI, стр. 58, 1887.

⁵ „On the state of fluids at their critical temperatures", „Proc. of the Roy. Soc.", XXX, стр. 478, 1880; „On the limit of the liquid state", там же, XXX, стр. 520, 1881 и там же XXXIII, стр. 294, 1882.

⁶ Ганней сначала склонялся к тому, чтобы признать способность жидкостей растворять твердые тела их существенным отличием от газов, однако вместе с Гогартом открыл, что и газы также способны растворять твердые тела („Proc.

ТЕОРИИ АГРЕГАТНЫХ СОСТОЯНИЙ ВЕЩЕСТВА 293

Ван-дер-Ваальс¹, успешно занявшийся в ряде статей математической теорией газов, дал объяснение критической температуры, мало отличающееся от предыдущего. Предполагая существование в молекулах, при определенной их величине, одних только притягательных сил и объясняя отталкивание движением молекул, он пришел к уравнениям состояния для упругих и капельножидких веществ, из которых вытекало существование еще промежуточного состояния с неустойчивым равновесием. *Критической температурой является та температура, выше которой подобное состояние неустойчивого равновесия становится уже более невозможным.*

С совершенно иной точки зрения, значительно ослаблявшей исключительное значение критической точки, объяснил открытие Эндрюса Жамен². Если нагревать жидкость в совершенно замкнутом пространстве, то количество лежащего над жидкостью пара быстро увеличивается и его плотность возрастает в таком же отношении, как и его вес. С другой стороны, часть вещества, оставшаяся в жидком состоянии, испытывает все возрастающее расширение, которое, наконец, превосходит расширение газа (Тилорье); следовательно, в конце концов, существует некоторая предельная температура, при которой жидкость и газ имеют одинаковый вес при одном и том же объеме. С этого момента они уже не остаются больше раздельными, и вся масса приходит в некоторое однородное состояние, которое считают газообразным. В этот момент вещество, по Жамену, достигает *критической точки*, которую, стало быть, можно определить как *температуру, при которой жидкость и ее насыщенный пар имеют одинаковую плотность*. В подтверждение своей теории Жамен приводит опыт Калльете, произведенный им в 1880 г. А именно, когда последний подверг в своем приборе сжатию смесь 1 части воздуха и 5 частей углекислоты, он заметил, что при некотором среднем давлении углекислота перешла в жидкое состояние. Когда же он, не изменяя температуры, увеличил давление до 150 или 200 *ат*, то увидел, что образовавшаяся жидкость вновь вся исчезла. Если правильно предположение Жамена, что исчезновение жидкой углекислоты происхо-

of the Roy. Soc.", XXIX, стр. 324, 1879; XXX, стр. 178 и 484. 1880). В самом деле, когда в жидкости было растворено твердое тело, температура плавления которого лежала гораздо выше критической точки жидкости, и когда затем температура постепенно повышалась, то тело оставалось в растворе, даже когда температура поднималась на 130° выше критической точки. Правда, алкоголь и эфир выделяли растворенное хлористое железо при температуре ниже критической точки, но последнее вновь растворялось в газе, когда температура повышалась на 8—10° выше критической точки. Этим явлением можно, пожалуй, объяснить противоречивые результаты, полученные Калльете и Готфейлем в 1880 г. с жидкой углекислотой, окрашенной синим галбановым маслом, когда окрашивающее вещество выделилось при достижении углекислотой критической точки („Comptes rendus", XCII, стр. 840, 1861). Высокое давление и высокая температура, т. е. большое сближение и значительная живая сила молекул, являются, согласно Ганнею, условиями растворимости твердого тела в газах.

¹ „Über den Übergangszustand zwischen Gas und Flüssigkeit", Leyden 1873; Реферат в „Beiblätter zu Pogg. Ann.", 1, стр. 10; „Die Continuität des gasförmigen und flüssigen Zustandes", немецкий перевод, Leipzig 1881.

² „Comptes rendus", XCVI, стр. 1448, 1883.

294 ИСПАРЕНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

дит исключительно вследствие выравнивания плотностей, то это исчезновение должно замедляться, если воздух в смеси заменить каким-либо менее плотным газом, например водородом. И действительно, когда Калльете ¹ по предложению Жамена однажды смешал 5 объемов углекислоты с одним объемом воздуха, а другой раз с одним объемом водорода, то для последней смеси всегда требовалось значительно большее давление, чтобы воспроизвести упомянутое выше явление. Впрочем, Рамсей, в письме в Парижскую академию наук, заявил притязание на свой приоритет по отношению к этой теории критической точки ² и справедливо сослался на опубликованную им еще за три года до того работу ³, где было сказано: «Критическая точка это та, при которой жидкость вследствие своего расширения, а газ вследствие своего сжатия достигают равного удельного веса и вследствие этого смешиваются. Так как при охлаждении жидкость сильнее сжимается, чем газ, то она во всей трубке выделяется из равномерной смеси в виде облака и затем, будучи более тяжелой, падает на дно». По этому поводу нельзя, однако, не отметить, что идея Рамсея-Жамена, несмотря на всю ее *кажущуюся простоту*, все-таки заключает в себе *значительные трудности*, так как она требует, чтобы одно и то же вещество, при одном и том же (внешнем) давлении и одной и той же температуре, мы представляли себе как жидким, так и газообразным, а также одновременно в обоих этих состояниях.

Как уже было упомянуто, Эндрюс в своей работе 1869 г. высказал надежду, что, подобно непрерывности перехода от газообразного состояния к жидкому, будет установлена и непрерывность перехода от жидкого состояния к твердому. При этом он указал на опыты Томсона по понижению точки плавления льда под влиянием давления. Интересно, что сначала была выявлена как будто большая близость *твердого состояния к газообразному*, чем к жидкому. Согласно Дальтону каждая жидкость кипит, когда упругость ее пара становится равной окружающему давлению; под меньшим давлением жидкость не может существовать как таковая. Следовательно, твердое тело, будучи доведено до столь высокой температуры, что упругость пара его жидкости превышает окружающее давление, должно прямо испариться без предварительного плавления. Но так как согласно дальтоновскому закону диффузии каждый газ распространяется независимо от присутствия другого газа, то можно думать, *что твердое тело испаряется уже и при обыкновенном атмосферном давлении, хотя упругость его пара еще значительно ниже атмосферного давления*. В соответствии с этим взглядом, который в новой теории теплоты находит для себя определенное подкрепление, Клаузиус, в известном своем сочинении 1857 г., в котором он развивает свою теорию испарения, говорит: «Аналогично жидким телам испарение можно наблюдать и у твердых тел; но отсюда, — ограничивает он далее свою мысль, — не следует,

¹ „Comptes rendus“, XCII, стр. 901, 1881.

² „Philosophical Magazine“ (5), XVI, стр. 118, 1883.

³ „Proc. of the Roy. Soc.“, XXXI, стр. 194, 1880. — W. Ramsay — профессор химии университетского колледжа в Бристоле.

НАГРЕВАНИЕ ЛЬДА 295

что испарение должно происходить с поверхности любого твердого тела»¹. Целльнер отбросил последнее ограничение и в своей работе «Über die Natur der Kometen» («О природе комет») ² исходит прямо из допущения, что *испарение не зависит от агрегатного состояния*, что каждое вещество испаряется при любой температуре, поскольку только давление *собственного* его пара не становится слишком большим, и что вообще все вещества различаются между собою только величиной упругости пара, которая при одних и тех же температурах у жидкостей, конечно, гораздо больше, чем у твердых тел. Затем Лотар Мейер ³ в 1875 г. экспериментально, по крайней мере, на одном примере показал, что переход твердого тела при его нагревании непосредственно в газ или же предварительно в жидкое состояние зависит только от давления. Эти процессы, однако, обратили на себя всеобщее внимание только тогда, когда Томас Карнелли ⁴ противопоставил эндрюсовскому положению о критической температуре, положение о критическом давлении, гласящее следующее: *для того чтобы твердое тело обратилось в капельную жидкость, давление должно быть выше некоторой точки, которую можно назвать критическим давлением; при давлениях ниже этой точки никакая степень тепла, как бы она ни была велика, не в состоянии расплавить вещество*. Для сулемы Карнелли осенью 1879 г. определил это критическое давление в 420 мм. В августе 1880 г. ему удалось определить эту же величину для льда в 4,6 мм; при давлении, большем 4,6 мм, лед при нагревании плавится; при меньшем давлении он испаряется. При этом Карнелли сделал еще поразительное замечание, что если давление поддерживать достаточно низким, а нагревание производить достаточно быстро, то температуру льда можно поднять гораздо выше точки кипения воды и даже довести ее до 180°. Данные Карнелли были впервые проверены Вюльнером ⁵, который полностью подтвердил их в той части, которая относилась к испарению льда, но не заметил при своих опытах нагревания льда выше нуля градусов. То же самое имело место и у Лотара Мейера ⁶, и, хотя Карнелли доказал факт нагревания льда не только *термометрически*, но и *калориметрически*, тем не менее многочисленные работы других физиков до настоящего времени не дали этих результатов. Карнелли сделал оговорку в своих сообщениях, указав, что нагревание не должно производиться на слишком большой поверхности льда, в противном случае слишком большое количество пара дало бы и слишком большую упругость; с другой стороны, необхо-

¹ „Pogg. Ann.", С, стр. 240.

² Leipzig 1872, стр. 86.

³ „Berichte der deutsch. chem. Gesellschaft, стр. 1627, 1875. — Lothar Meyer (родился в 1830 г.) — профессор химии в Тюбингене.

⁴ „The conditions necessary for the existence of matter in the liquid state. Existence of ice at high temperatures", „Nature", XXII, стр.434, 1880. „Experiments on ice under low pressures", „Nature", XXIII, стр. 341, 1881. Эндрюс говорил о *критическом давлении* в несколько ином смысле, чем это слово применяется здесь; у него этот термин обозначал давление, необходимое для сгущения газа, находящегося при температуре немногим ниже его критической температуры.

⁵ „Wied. Ann.", XIII, стр. 105, 1881.

⁶ „Berichte der deutsch. chem. Gesellschaft", стр. 718, 1881.

296 ВОЗЗРЕНИЯ ПФАУНДЛЕРА, ЧИНТОЛЕЗИ И КАНТОНИ

димо, чтобы нагревание происходило достаточно быстро, так как в противном случае вся теплота пойдет на испарение льда и ничего не пойдет на повышение его температуры. Поэтому все же возможно, что отрицательные результаты других физиков, повторявших опыты Карнелли в более или менее измененной форме, получились не в силу невозможности указанного Карнелли нагревания льда, а вследствие нецелесообразной постановки их опытов ¹.

Многообразные переходы, которые в действительности существуют между твердым и жидким состояниями, *мягкие* и *полужидкие* формы, которые встречаются у *химически простых* или, по крайней мере, *однородных* веществ, как фосфор, натрий, свинец и т. д., и которые, во всяком случае, нельзя объяснить растворением твердого вещества в жидком, впервые в 1867 г. исследовал Пфаундлер ² и не без успеха попытался объяснить на основе новой теории теплоты. Согласно Пфаундлеру, следует считать, что у таких всегда *аморфных* тел положения отдельных молекул, направления их колебаний, взаимные расстояния и т. д. очень беспорядочны и различны. Когда такому веществу сообщается теплота, то средняя температура всех его молекул повышается и, наконец, наступает момент, когда вновь притекающая теплота дает возможность молекулам, обладающим в это мгновение максимумом живой силы, оставить свое прочное положение равновесия и в качестве свободных жидких молекул получить поступательное движение. Если в это время прекратить дальнейший приток теплоты, то среди множества твердых молекул будет существовать некоторое количество жидких. Однако в поступательном движении не находятся все время одни и те же молекулы. Благодаря взаимным столкновениям они имеют возможность передать свой излишек другим молекулам; постоянным остается лишь среднее число жидких молекул. Дальнейший приток тепла повышает число жидких молекул и уменьшает число твердых. Если приток тепла происходит быстро, то все подпавшие под его действие молекулы становятся жидкими. Если же всей системе предоставляется некоторое время для выравнивания, то жидкие молекулы постепенно распределяются равномерно по всей системе, — конечно, если теплоты было недостаточно для того, чтобы расплавить все молекулы. При продолжающемся притоке теплоты жидких молекул становится все больше, группы твердо сплоченных частиц становятся все реже, и, наконец, последние совер-

¹ В пользу *большой устойчивости твердого агрегатного состояния* по сравнению с жидким даже у тех веществ, которые при обычных условиях находятся в газообразном состоянии, говорит следующее интересное явление, наблюдаемое Ландольтом. Н. Landolt (родился в 1831 г.; член Берлинской академии наук) выпускал жидкую углекислоту в конический полотняный мешок, а затем образовавшийся там рыхлый снег он в толстостенной деревянной форме сбивал молотком в плотный цилиндр, который при этом приобретал примерно твердость мела и мог быть без вреда взят в руки. Такие цилиндры сохранялись довольно долго, так как газообразование у них происходило только на поверхности и притом тем медленнее, чем сильнее была сжата эта масса („Berichte der deutsch. chem. Gesellschaft", XVII, стр. 309, 1884).

² „Sitzungsber. d. Wien. Akad", 2 отдел, XXIII, стр.249. — L. Pfaundler (родился в 1839 г.) — профессор физики в Инсбруке.

ВОЗЗРЕНИЯ ПФАУНДЛЕРА, ЧИНТОЛЕЗИ И КАНТОНИ 297

шенно исчезают. Тела, плавление которых протекает указанным образом, называются в начале процесса *мягкими*, а потом полужидкими; следовательно, *тела в мягком состоянии* — это смеси твердых групп молекул с жидкими, или с поступательно движущимися молекулами, которые непрерывно обмениваются своими местами с твердыми частицами. Согласно такому определению можно объяснить много свойств мягких тел. Если мягкое тело быстро согнуть, то оно ломается, при медленном же сгибании оно сохраняет новое положение. В самом деле, при сгибании твердые молекулы тела приходят в напряженное неустойчивое положение, а жидкие сохраняют свою подвижность. При постепенной замене твердых молекул жидкими и обратно твердые молекулы располагаются устойчивым образом, и потому напряжение должно постепенно исчезнуть. В результате сгиб остается постоянным. Ясно, что этим путем изменение формы может быть постепенно проведено сколь угодно далеко, если только молекулам предоставляется достаточно времени для того, чтобы напряженные положения заменить свободными. Но для этого необходимо посредничество свободных поступательно движущихся молекул. Когда сгибание производится очень быстро, то перемещение твердых молекул в свободные положения не может происходить с такою же быстротою, тело ломается или же после прекращения давления упруго выпрямляется. Точно так же и свойство мягких тел соединяться в одно целое, когда их прижимают друг к другу, объясняется на основании тех же принципов. Находящиеся в этот момент на поверхности обоих тел жидкие молекулы образуют при замене их твердыми прочные связи. Так как невероятно, чтобы впоследствии все находящиеся на пограничных поверхностях твердые частицы одновременно вновь стали жидкими, то однажды установленная связь сохраняется, и тем в большей мере, чем дольше длился контакт, так как тем больше времени молекулы имеют для замены их твердыми.

Аналогичные представления относительно жидкостей и газов были развиты Чинтолези и Кантони. Чинтолези¹ путем многообразных — и иногда поразительных — микроскопических наблюдений пришел к выводу, что *расширение жидкостей в тонкие пленки* всегда сопровождается *выделением* в них *газообразных масс* и что подобное явление кипения происходит во всякой пленке. Распространение одной жидкости по какой-либо другой, равно как разрыв жидкой пленки, обуславливается, по его мнению, парами собственного вещества, молекулы которых, вследствие их всесторонних движений, разъединяют жидкие молекулы. Кантони² на основании опытов Амага, согласно которым для многих жидкостей коэффициенты сжимаемости значительно возрастают с повышением температуры, пришел к выводу, что все жидкости представляют собою смеси жидких и газообразных молекул; что между жидкими молекулами, которые лишь в очень ограниченной

¹ „Reale Istituto Lombardo Rendiconti" (2), IX, стр. 187; „Revue der Fortschr. der Naturw.", стр. 336, 1878.

² „Il nuovo Cimento" (3), VI, стр. 277; „Revue d. Fortschr. d. Naturw.", стр. 23, 1881.

298 КИПЕНИЕ И ИСПАРЕНИЕ

степени расширяются от теплоты и сжимаются от механической силы, всегда находятся пары этой самой жидкости (*интермолекулярные пары*), упругость которых имеет максимальную величину для существующей температуры. *Гипотезы Пфаундлера, Чинтолези и Кантони опираются на принцип Максвелла*, согласно которому молекулярные движения даже в однородных веществах и при вполне однородной температуре никогда не происходят равномерно, но обладают всевозможными величинами, колеблющимися около некоторого среднего значения. Максвелл, правда, применил эту гипотезу только к газам: но в принципе, по-видимому, ничто не препятствует тому, чтобы распространить ее и на другие агрегатные состояния.

В известной связи с этими работами находятся также *исследования нар, процессом изменения агрегатного состояния*. Гэ-Люссак сделал наблюдение, что вода в металлических сосудах легче закипает, чем в хорошо вычищенных стеклянных сосудах¹; позднее более легкое образование паров стали объяснять, главным образом, *присутствием в жидкостях газов*². Эту точку зрения отстаивал Дюфур в ряде работ, начиная с 1861 г.³. Он составлял такую смесь льняного масла (удельный вес 0,93) с гвоздичным (удельный вес 1,05), что ее удельный вес был в точности равен удельному весу воды, и, нагрев ее до 120°, вводил в нее пипеткой большую каплю воды. Последняя распадалась на маленькие капельки, которые сохранялись, не испаряясь. Вода могла быть таким путем нагрета до 170°, хлороформ до 100° С. Только тогда, когда к этим капелькам прикасались металлическим или деревянным острием, они мгновенно обращались в пар. Острия теряли свое действие, когда, не вынося на воздух, их несколько раз подряд применяли для выпаривания капель. При других опытах Дюфур помещал подкисленную воду, освобожденную от воздуха при помощи кипения, в стеклянную реторту и откачивал воздух до тех пор, пока его давление не соответствовало точке кипения в 60°. Тогда он мог доводить нагревание воды до 75°, и кипение не наступало. Однако последнее начиналось тотчас же, как только он пропусканием электрического тока вызывал в жидкости появление пузырьков газа. Дюфур считал на основании своих опытов доказанным, что *кипение тождественно*

¹ „Ann. de chim. et de phys.", LXXXII, стр. 174, 1812. Ф. Марсэ нашел, что в стеклянных сосудах кипящая вода в среднем теплее своего пара на 1,06° С, а в металлических только на 0,15—0°,20 С („Comptes rendus", XIV, стр. 586, 1842; „Pogg. Ann.", LVI, стр. 170).

² Согласно Ф. Донни сцепление жидкостей представляет собою не слабую, а наоборот, довольно значительную силу, позволяющую переход в газ только с поверхности. (Опыт с прилипанием кружка несколько не свидетельствует о незначительности сцепления, так как кружок со своим слоем жидкости отрывается от остальной жидкости не сразу, а только постепенно.) Когда жидкость нагревается, то в более нагретых местах выделяются пузырьки газа, на внутренней поверхности которых жидкость продолжает испаряться; с достижением температуры кипения это внутреннее испарение переходит в кипение („Pogg. Ann.", LXVII, стр. 562, 1846). Грове прямо утверждал, что никто еще никогда не наблюдал кипения совершенно чистой воды, не содержащей воздуха („Pogg. Ann.", CXXIV, стр. 295, 1861).

³ „Comptes rendus", LII, стр. 986, 1861; LIII, стр. 846; „Pogg. Ann.", CXXIV, стр. 295, 1865.

ОТВЕРДЕВАНИЕ 299

с испарением и что первое может наступить только тогда, когда в жидкости находятся свободные поверхности, пузыри газа и т. п. или когда последние образуются от сотрясений и пр.¹. По отношению к переходу в твердое состояние жидкости тоже сохраняют известную устойчивость. Так, Дюфур охлаждал водяные капли в условиях равновесия опыта Плато до -20° , и затвердевание не наступало. Он пришел к выводу, что молекулярное равновесие не может зависеть только от сцепления и тепловых движений, — при переходе из одного агрегатного состояния в другое должны действовать еще и другие причины. «Процесс кипения, — говорит он в 1865 г.², — очевидно, охватывает два явления: во-первых, образование пара во всей массе жидкости, которое возможно не раньше, чем когда упругость этого пара станет равной окружающему давлению, и, во-вторых, своеобразное, неясное по своей природе молекулярное явление, превращение жидкого состояния в газообразное. Благодаря первому из этих явлений кипение зависит от давления, благодаря второму — от причин, которые способны нарушить молекулярное равновесие жидкости. Причины эти, вероятно, различной природы, и весьма возможно, что соприкосновение некоторых посторонних тел, особенно газов, принадлежит к числу таких влияний, нарушающих равновесие жидкости... Между замедлением кипения и *затвердевания* существуют несомненные аналогии... они, очевидно, представляют собою факты одного и того же порядка, зависящие от аналогичных причин... Когда сера остается еще жидкою при 30 или 40° , то не сцепление мешает ее отвердеванию и продолжает удерживать ее в положении неустойчивого равновесия, так как в момент отвердевания молекулы ее сближаются друг с другом и образуют гораздо более вязкое тело, чем в жидком состоянии». Специально вопросом о затвердевании жидкостей Дюфур занялся также в работе 1861 г.³ Здесь он пришел к выводу, что замерзание воды могут вызвать различные случайные обстоятельства, но что вполне надежно его можно вызвать только прикосновением кусочка льда. Но Франкенгейм⁴ годом ранее высказался еще определеннее: «Как это доказал уже Ловитц в прекрасной статье 1794 г. («Nov. comm. Petrop.», XI, стр. 271), существует, собственно говоря, только одно условие, которое совершенно препятствует существованию жидкости ниже ее точки замерзания, а именно, прикосновение к ней однородным кристаллом. При отсутствии такой поверхности соприкосновения, с каким бы телом жидкость ни соприкасалась и как бы ее ни приводить в движение, ее всегда можно охладить в большей или меньшей степени ниже ее точки замерзания без того, чтобы она затвердела. Но как только в *каком-либо* месте образуется кристалл, кристаллизация тотчас же

¹ G. Krebs (преподаватель гимназии во Франкфурте на Майне) в основном повторил и подтвердил опыты Дюфура; он указал, что вода, не содержащая воздуха и нагретая до 140 или 170° , порою не закипала, а только быстро испарялась с поверхности („Pogg. Ann.“, CXXXVI, стр. 148, 1869).

² „Pogg. Ann.“, CXXIV, стр. 315 — 316.

³ Там же, CXIV, стр. 530, 1861.

⁴ Там же, CXI, стр. 1, 1860.

300 ПАДЕНИЕ ВОЗДУШНЫХ СТРУЙ НА ТВЕРДЫЕ ТЕЛА

распространяется от частицы к частице, пока в жидком состоянии не останется ни одной части, температура которой лежит ниже точки замерзания». Но в 1858 г. Муссон¹ указал на то обстоятельство, что затвердевание воды затрудняется всеми теми условиями, которые уменьшают подвижность ее частиц, и соответственно этому установил, что в капиллярных трубках вода замерзает позднее, чем в открытых сосудах.

Подобно связи между изменениями агрегатного состояния тел и тепловыми движениями столь же усердно и тщательно изучалась в этот период и связь между последними и *внутренней механической работой* тел. Вольпичелли в 1871 г.² с успехом работал над старой проблемой о температурных изменениях, которые вызываются *воздушными струями, падающими на твердые тела*. Для того чтобы исключить помехи, могущие произойти вследствие расширения сосудов, содержащих в себе термометрические жидкости, он направлял струю воздуха из приемника, в котором газ был сжат до 4 ат, на термоэлектрический столбик. При этом, к своему удивлению, он констатировал повышение температуры, когда столбик был поставлен очень близко к вытечному отверстию, и, напротив, понижение температуры при некотором среднем расстоянии. Аналогичные, но только менее ясные результаты он получил при употреблении воздушных мехов. Вольпичелли объяснял это явление *троякого* рода причинами, влияющими на тепловое состояние текущего газа, из которых в указанном случае могла получить перевес то одна, то другая. А именно, попадающая на твердую стенку первоначально сжатая струя воздуха совершает вследствие столкновения ее молекул с поверхностью твердого тела *внешнюю работу*; а вследствие проникновения молекул воздуха в глубь твердого тела и происходящего при этом уплотнения — *внутреннюю работу*; и, наконец, она совершает еще *внутреннюю* работу вследствие собственного расширения на своем пути до твердого тела. Первые две причины вызывают повышение температуры, а третья приводит к ее понижению.

Изменения температуры заметил в 1872 г.³ Дюфур и при *диффузии газов* через пористые перегородки. Наблюдая диффузию водорода в воздух и воздуха в углекислоту, он установил, что всегда имеет место повышение температуры на той стороне, где происходит диффузия, и понижение на той стороне, где газ выходит из стенки. По его мнению, эти изменения происходят вследствие сгущения газа на поверхности, через которую газ выходит. Из такого представления о диффузии вытекала и обратная задача, которой Б. Феддерсен и занялся уже в следующем году⁴. Он показал, что явления диффузии происходят и в однородном газе, если только температура на обеих сторонах

¹ А. Mousson (родился в 1805 г.) — профессор физики Цюрихского политехникума, „Pogg. Ann.", CV, стр. 161, 1858.

² „Comptes rendus", LXXIII, стр. 492. — Paolo Volpicelli (1814—1880)— профессор математической физики Римского университета.

³ „Arch. de sciences phys. et nat.", 1872; „Revue der Fortschritt. der Naturwissenschaften", стр. 1, 1874.

⁴ „Pogg. Ann.", CXLVIII, стр. 302, 1873.

ТЕРМОДИФФУЗИЯ 301

пористой перегородки поддерживается на различных уровнях. В этом случае газы всегда переходили с холодной стороны на теплую. Феддерсен назвал это явление *термодиффузией*. Он сам, однако, указал, что его работа вызвана статьей К. Неймана ¹, в которой было показано, что если в бесконечно длинной или в замкнутой в самой себе трубке, наполненной каким-нибудь газом, одна часть последнего обладает плотностью, отличной от остального газа, и если оба конца трубки искусственно поддерживать при различной температуре, то происходит непрерывное движение газа от холодного места к теплоте. Данные Феддерсена были позднее подтверждены Осборном Рейнольдсом ². Последний установил, что при просачивании водорода через пористую пластинку, когда начальное давление было равно атмосферному, а с обеих сторон пластинки поддерживалась постоянная разность температур в 160° F (52 и 212°), — получалась постоянная разность давлений на обеих сторонах пластинки — в 1 дюйм ртути, при этом более высокое давление оказывалось на более теплой стороне. Он сравнил затем соответствующие разности давлений и температур для различных газов и различных пластинок и пришел, таким образом, к общему закону, что разности давлений не зависят от толщины пластинок, а зависят только от размера их пор и от плотности газа или от расстояния между его молекулами. Но в этом он нашел надежное доказательство молекулярного строения газов ³. Шарль Соре ⁴ особым образом применил понятие о тепловой диффузии и к жидкости. Концы вертикальной цилиндрической трубки, наполненной однородным соляным раствором (калийной селитры или поваренной соли), он поддерживал при различных температурах (верхний конец при 78°, а нижний при 15—18°) и наблюдал, что в холодной части трубки раствор стремился

¹ „Ber. über die Verhandlung der k. Sächsisch. Ges. d. Wissensch., math.-phys Classe", стр. 49, 1872. С. Neumann (родился в 1832 г.) — профессор математической физики в Лейпциге, сын Фр. Неймана.

² „Experimental researches on thermal transpiration of gases through porous plates and on the laws of transpiration and impulsion, including an experimental proof that gas is not a continuous plenum", „Proc. of the Roy. Soc.", XXVIII, стр. 304, 1879; „Note on thermal transpiration", „Proc. of the Roy. Soc.", XXX, стр. 300, 1880. О. Рейнольдс, по-видимому, не знал работы Феддерсена, так как он говорит: „К числу наиболее известных явлений принадлежит различие в скоростях, с которыми различные газы просачиваются через тонкие каналы, и разность давлений, возникающая в том случае, когда два различных газа, находившихся первоначально при одинаковом давлении, разделяются пористой перегородкой. Но, по-видимому, до сих пор еще не было сделано попытки выявления аналогичного явления, а именно, не станет ли газ проходить через перегородку при наличии одной лишь разности температур на той и другой сторонах пластины, при отсутствии какой-либо первоначальной разности давления или различия химического состава. Мне также неизвестно, высказал ли кто-нибудь предположение о возможности подобного действия разности температур".

³ „Этот закон является не чем иным, как абсолютным экспериментальным доказательством того, что газ имеет разнородное строение и состоит из отдельных молекул, что он не представляет собою непрерывного целого, каждая сколь угодно малая часть которого обладает теми же свойствами, что и целое".

⁴ „Arch. des scienc. phys. et nat." (3), I, стр. 48, 1879; (3), IV, стр. 209, 1880. — Ch. Soret — профессор физики в Женеве.

302 ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ И ВНУТРЕННЯЯ РАБОТА

концентрироваться за счет теплой части и что это действие быстро возрастало с увеличением первоначальной концентрации раствора. И в данном случае диффузию следует рассматривать как особое действие тепловых молекулярных движений, ибо, если бы мы пожелали объяснить ее только известным возрастанием растворимости солей с повышением температуры, пришлось бы ожидать перемещения соли в направлении, прямо противоположном тому, какое наблюдается в действительности¹.

Своеобразную аномалию превращения внешней и внутренней работы открыл в 1857 г. Джоуль² в каучуке. В то время как металлические провода при растягивании охлаждаются, а при сжатии нагреваются, шнуры из вулканизированного каучука дают как раз обратное явление. Гови и Пьер полностью подтвердили данные Джоуля, а Виллари³ попытался объяснить это странное явление. Он подвесил термоэлектрический столбик на шелковой нити таким образом, чтобы его можно было легко опускать на каучуковую полосу, которая попеременно то растягивалась, то сжималась. Таким путем он установил, что повышение температуры при растяжении каучука абсолютно больше, чем понижение ее при сжатии, так что после многочисленных деформаций в ту и другую сторону всегда получается большой избыток теплоты. Этот избыток указывает на то, что часть внешней работы обращается во внутреннюю. Таким образом, температурные изменения при расширении газов и при расширении каучука имеют различные источники; у первых происходит охлаждение вследствие того, что они производят внешнюю работу; у каучука же происходит нагревание вследствие того, что он поглощает внутреннюю работу. Это объяснение образования тепла находит, по мнению Виллари, блестящее подтверждение в опытах Варбурга⁴. «Последний доказывает, что твердые тела нагреваются, когда они издают или проводят звук, так как в них живая сила превращается во внутреннюю работу и теплоту; поэтому в телах развивается тем больше тепла, чем быстрее в них прекращается звучание или передаваемое ими звуковое колебание. Из всех исследованных тел каучук потому нагревается сильнее других, что он быстрее всего гасит звуковые колебания. Аналогия между наблюдениями Варбурга и моими является полной и его объяснения согласуются с приведенными мною раньше данными. Отсюда мы можем также вывести заключение, что и те тела, которые охлаждаются при растяжении и нагреваются при сжатии, должны при ряде повтор-

¹ Следует, однако, отметить, что подобные наблюдения были сделаны Людвигом (родился в 1816 г., профессор физики в Лейпциге) уже в 1856 г. („Wiener Sitzungsber.", XX, стр. 539), причем он воспользовался почти тем же методом, как и Соре. Людвиг соединил вместе две реторты, наполненные каждая 8,98%-ным раствором серноокислого натрия, и поместил одну из них *A* в кипящую воду, а другую *B* — в тающий лед. По прошествии семи суток более теплая реторта *A* содержала уже только 4,31%-ный раствор, между тем как в холодной реторте *B* соль выкристаллизовалась.

² „Philosophical Magazine" (4), XIV, стр. 226; XV, стр. 538.

³ „Nuovo Cimento" (2), I, стр. 301; „Pogg. Ann.", CXLIII, стр. 274, 1871.

⁴ „Erwärmung fester Körper durch das Tönen", „Pogg. Ann.", CXXXVII, стр. 632, 1869.

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ 303

ных быстрых растяжений нагреваться, так как и в таких телах часть затраченной силы должна обращаться во внутреннюю работу, а затем в теплоту».

В 1865 г. Тэту и Б. Стюарту ¹ показалось, будто им удалось установить *прямое превращение материального движения в эфирное*. Приводя при помощи зубчатых колес во вращение легкие алюминиевые кружки в сильно откачанном сосуде, они наблюдали выделение теплоты, которая как будто совершенно не зависела от степени разрежения воздуха и которую, казалось, нельзя было объяснить какой-либо иной причиной, кроме упомянутой выше. В следующем году эти физики ² показали, что указанное нагревание не может быть объяснено ни индуцирующим влиянием земного магнетизма, ни трением подшипников. Но, с другой стороны, они не считали совершенно исключенным, хотя при их опытах это и представлялось маловероятным, что вследствие несовершенства аппарата, при помощи которого приводились в движение кружки, эти последние могли приходить в колебание, которое постепенно поглощалось вязкостью металла и превращалось, таким образом, в теплоту ³. О. Мейер тоже указывал на неравномерность движения, и из отклонений кружка, которые Тэт и Стюарт приписывали только его несколько косому положению по отношению к оси, он заключил о качании кружка и вызванном этим переходе механического движения в теплоте ⁴. Несколько лет спустя Тэт и Стюарт ⁵ вновь повторили эти опыты с усовершенствованными приборами и, перебрав различные возможные причины образования теплоты, вновь пришли к выводу, что все-таки часть ее может быть объяснена только так, как они это предложили раньше. Проблемой, которая непосредственно зависела от представления об агрегатных состояниях тел и которая при новой теории тепла должна была получить совсем иной вид, был вопрос о *теплопроводности* тел. Пока на агрегатные состояния смотрели как та более или менее неизменные формы существования отдельных веществ и пока теплоту считали элементарной материей, независимой от других веществ, — до тех пор можно было допускать, что эта материя может свободно распространяться только в твердых телах, а не в жидких и газообразных. Но когда теплоту признали некоторым родом движения, свойственным и мельчайшим частицам весомой материи, возникла необходимость выяснить возможность передачи этого движения от частицы к частице при всех вообще агрегатных состояниях вещества. Для твердых веществ теплопроводность была уже наперед обеспечена; для газообразных тел, согласно новой теории газов, необходимость выравнивания теплового движения внутри газа не могла не быть признана; следовательно, теперь в первую очередь представлялось необходимым экспериментально

¹ „Proc. of the Roy. Soc.", XIV, стр. 339, 1865; „Philosophical Magazine" (4), XXX, стр. 314.

² „Proc. of the Roy. Soc.", XV, стр. 290, 1886; „Philosophical Magazine" (4), XXXIII, стр. 224; „Pogg. Ann.", CXXXVI, стр. 165.

³ „Pogg. Ann.", CXXXVI, стр. 166.

⁴ Там же, CXXXVII, стр. 381; CXXXV, стр. 285.

⁵ „Proc. of the Roy. Soc.", XXI, стр. 309, 1870.

304 ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ЖИДКОСТЕЙ

исследовать теплопроводность *жидкостей*, строение которых и по новой теории никоим образом еще нельзя было признать ясным.

Последние по времени опыты над теплопроводностью жидкостей во время господства старой теории теплоты были опубликованы в 1839 г. Дебре ¹; они относились, впрочем, только к *воде*. В наполненный водою деревянный цилиндр Дебре сбоку вставил герметически плотно семь термометров таким образом, что их шарики были расположены на оси цилиндра, а трубки выступали наружу. Нагревание производилось с помощью помещенного на поверхности воды медного ящика, через который протекала горячая вода определенной температуры. Когда наступило стационарное состояние, которое установилось лишь спустя 36 час, термометры показали ту же кривую распределения температур, какая наблюдалась на твердых телах, но только здесь падение температуры было гораздо более быстрым. Дебре сделал отсюда вывод, что жидкости проводят теплоту совершенно таким же образом, как и твердые тела, но только в гораздо меньшей степени. И только 30 лет спустя — через много лет после победы новой теории теплоты, а именно, в 1868 г. — Паальцов ² предпринял новые измерения проводимости различных жидкостей, которые он провел по тому же методу, что и Дебре. При этом он, однако, больше руководился мыслью о сопоставлении электропроводности и теплопроводности, чем чисто термическими соображениями. С точки зрения этой цели ему представилось достаточным получить два следующих параллельных ряда:

ПРОВОДИМОСТЬ ДЛЯ

теплоты:

Ртуть
Вода
Медный купорос
Серная кислота
Цинковый купорос
Раствор поваренной соли

электричества:

Ртуть
Серная кислота
Раствор поваренной соли
Цинковый купорос
Медный купорос
Вода

Однако с этого времени начали более усердно заниматься вопросами теплопроводности. Гютри ³ около того же времени, как и Паальцов, измерил относительные сопротивления, которые оказывают тонкие слои различных жидкостей проведению теплоты, и отсюда сделал выводы о теплопроводности жидкостей. Однако полученные им результаты значительно разошлись с результатами Паальцова, и только одно казалось твердо установленным как по тем, так и по другим данным, — что проводимость с температурой повышается. Абсолютные числа

¹ „Sur la propagation de la chaleur dans les liquides“, „Ann. de chim. et de phys.“ (2), LXXI, стр. 206; „Pogg. Ann.“, XLVI, стр. 340.

² „Pogg. Ann.“, CXXXIV, стр. 618. A. Paalzow — преподаватель физики в Берлине.

³ „Phil. Trans.“, стр. 637, 1869.— Fred. Guthrie (1833—1886) — под конец жизни профессор физики в Королевской горной школе в Лондоне.

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ЖИДКОСТЕЙ 305

для проводимости опубликовал впервые Лундквист ¹ в 1869 г., пользуясь методом, который уже в 1861 г. Ангстрем ² применил для твердых тел; он нагревал и охлаждал жидкость через равные промежутки времени и наблюдал температуры в двух точках на оси цилиндра, в котором содержалась эта жидкость, и затем вычислял ее абсолютную теплопроводность. Таким путем он, между прочим, нашел (если l обозначает проводимость, s — удельный вес и t — температуру):

	l	s	t
Для воды	0,0933	1,000	40°, 8
„ раствора цинкового купороса . .	0,0964	1,242	44°, 1
„ „ поваренной соли	0,0895	1,178	43°, 9 ³ .

Иные результаты получил спустя пять лет Винкельман ⁴, пользуясь методом, который Стефан раньше применил для измерения теплопроводности газов и который мы опишем ниже; вот данные Винкельмана:

	l		
Вода	0,0924	} (удельный вес 1,110) (20°/о-ный)	} t от 0 до 20°
Раствор поваренной соли .	0,1065		
Раствор хлористого калия .	0,1147		
Алкоголь	0,0904		
Сероуглерод	0,1202		
Глицерин	0,0449		

И, наконец, опять-таки иные данные для теплопроводности жидкостей опубликовал в 1879 г. Г. Вебер ⁵, который производил эти измерения по другому методу. Слой исследуемой жидкости, толщиной всего в несколько миллиметров, заключенный между двумя горизонтальными медными пластинками и находившийся при средней комнатной температуре, он охлаждал с нижней поверхности до 0° и наблюдал ход температуры на верхней поверхности.

Из многочисленных наблюдений он затем вычислил приведенную ниже таблицу, в которой γ обозначает удельную теплоемкость единицы объема, а e — величину, которую он назвал *температуропроводностью* соответствующих веществ:

¹ „Undersökning af några vätskors lednings formåga for värme“, „Upsala Univ. årsskrift“, стр. 1, 1869.

² „Pogg. Ann.“, CXIV, стр. 513; из „Oefversigt at K. Vet Acad. Förhandl“, 1861.

³ Определение теплопроводности здесь то же, которое в свое время дал Фурье, и которое было нами изложено в 1 выпуске (стр. 207). Единицами меры являются здесь грамм, сантиметр, минута и градус по Цельсию.

⁴ „Pogg. Ann.“, CLIII, стр. 481, 1874. — А. Winkelmann — профессор физики в Йене.

⁵ „Wied. Ann.“, X, стр. 103, 204 и 472, 1879. — Н. Fr. Weber — профессор в Цюрихе.

	l	γ	$e = \frac{l}{\gamma}$
Вода	0,0745	1,000	0,0745
Раствор медного купороса . .	0,0710	0,984	0,0733
Цинковый купорос в возрастающей концентрации	{ от 0,0711 до 0,0691	{ от 0,976 до 0,962	{ от 0,0729 до 0,0718
Раствор поваренной соли . . .	0,0692	0,942	0,0735
Глицерин	0,0402	0,738	0,0545
Алкоголь	0,0292	0,450	0,0649
Сероуглерод	0,0250	0,325	0,0769
Эфир	0,0243	0,378	0,0643
Бензин	0,0200	0,270	0,0741 ¹

Вебер пришел на основании этих данных к заключению, что температуропроводность e можно рассматривать как приблизительно постоянную величину, так как даже для таких необыкновенно вязких жидкостей, как глицерин, она сравнительно немного отклоняется от среднего значения ². Следовательно, теплопроводность можно было бы представить формулой $l=e\cdot\gamma$ или $l=e\cdot s\cdot c$, и тогда она *лишь незначительно зависела бы от внутреннего трения*, но зато она была бы *прямо пропорциональна удельной теплоемкости единицы объема*, а вместе с тем и *запасу теплоты* в ней. Что касается зависимости от температуры, то дальнейшие опыты показали, что *теплопроводность, во всяком случае, с повышением температуры возрастает*, причем, *вероятно, по линейному закону*.

Впрочем, с точки зрения теплопроводности ртуть, по-видимому, занимает особое место в ряду прочих жидкостей, так как при измерении ее теми же самыми методами, какие применялись для прозрачных неметаллических жидкостей, получилась температуропроводность $e=2,00$, т. е. почти в 30 раз большая, чем у тех жидкостей. «Этот результат, — говорит Вебер, — заставляет думать, что процесс теплопровод-

¹ „Wied. Ann.", X, стр. 315.

² В. Беетц, определивший около этого времени теплопроводность многих жидкостей, тоже нашел, что она возрастает с подвижностью частиц, т. е. с уменьшением вязкости; по его мнению, это вполне согласуется с тем фактом, что проводимость возрастает с температурой („Wied. Ann.", VII, стр. 435). Но Кри („Proc. of the Roy. Soc.", XLII, стр. 300, 1887) рядом новых опытов прямо подтвердил положение Вебера, что теплопроводность пропорциональна произведению плотности на удельную теплоемкость. Быть, может, к данному вопросу имеют отношение интересные наблюдения Герберта Томлинсона, что теплопроводность железного стержня уменьшается при продольном и увеличивается при поперечном его намагничивании („Proc. of the Roy. Soc.", XXVII, стр. 109, 1878). Между тем Наккари и Беллати уже ранее пришли по этому вопросу к отрицательному результату, а именно, они нашли, что намагничивание железа *совершенно не влияет* на его теплопроводность („Cimento" (3), I, стр. 72 и 107; „Beiblätter zu Wied. Ann.", I, стр. 475).

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ГАЗОВ 307

ности в металлических жидкостях зависит от совершенно иных моментов, чем в неметаллических. В то время как в последних теплопроводность, по-видимому, заключается в простой передаче живой силы движущихся весоных молекул от слоя к слою, найденный для ртути результат позволяет предполагать, что в распространении теплоты внутри металлических веществ существенным элементом является *внутреннее лучеиспускание*, происходящее от слоя к слою, и что происходящая между каждыми двумя соседними слоями передача живой силы движущихся весоных молекул имеет лишь второстепенное значение. Этот факт бросает совершенно новый свет на установленную, но до сих пор оставшуюся не объясненной *аналогию между теплопроводностью и электропроводностью металлов*. Теперь возникает надежда, что параллельный ход обеих этих проводимостей может быть объяснен»¹. При этом Вебер определенно отмечает, что произведенные раньше исследования проводимости жидкостей всегда давали разноречивые результаты, что его собственные результаты в свою очередь отличаются от всех прежних, но пытается доказать, что при введении надлежащих поправок последние можно привести в согласие с полученными им числами. Тем не менее, и Веберу не удалось окончательно разрешить этого вопроса. Винкельман в целом ряде статей особенно настойчиво отстаивает свои выводы против Вебера².

Благоприятнее, чем с жидкостями, по крайней мере, в теоретическом отношении, обстояло дело с *газами*, так как здесь действие неуловимых молекулярных сил было исключено и новейшая теория газов создала простые и ясные соотношения. После того как Клаузиус сумел выразить формулой скорость поступательного движения молекул газа, а Максвелл дал формулу для числа соударений между этими молекулами за определенное время, было уже нетрудно вычислить и скорость выравнивания различных движений в системах молекул, т. е. теплопроводность газов. Максвелл в своих известных статьях 1860 г.³ и Клаузиус в работе 1862 г.⁴, где он отстаивал механическую теорию газов против Иохмана, прямо вывели для теплопроводности l газов формулы, которые можно представить в следующем виде: $l = a \cdot \eta \cdot c$ и которые отличались друг от друга только постоянным множителем a . Так как коэффициент внутреннего трения η и удельную теплоемкость c при постоянном объеме можно было определить отдельно, то отсюда можно было просто вычислить теплопроводность газов. Действительно, Максвелл имел возможность прямо показать, что теплопроводность атмосферного воздуха должна быть в 3500 раз меньше теплопроводности железа, а Клаузиус, — что она должна быть в 1400 раз меньше теплопроводности свинца. Если допустить, а это, строго говоря, не вполне верно, что удельная теплоемкость для каждого газа есть величина постоянная, то теплопроводность будет изменяться только в зависимости от коэффициента внутреннего трения и вместе с ним будет

¹ „Wied. Ann.", X, стр. 494.

² См. полемику между Винкельманом и Вебером в „Wied. Ann.", X, стр. 668; XI, стр. 352 и 735.

³ „Philosophical Magazine" (4), XX, стр. 31, 1860.

⁴ „Pogg. Ann.", CXV, стр. стр. 1, 1862.

308 ОПЫТНОЕ УСТАНОВЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ГАЗОВ

независима от давления, но в то же время она будет *прямо пропорциональна квадратному корню из температуры*. Клаузиус тоже признал правильность этих положений и еще отметил, что наиболее легкие газы должны давать одновременно наибольшие коэффициенты трения и наибольшие теплопроводности. Но Максвелл, как уже было упомянуто, считавший необходимым допустить пропорциональность внутреннего трения не квадратному корню, а просто температуре, счел необходимым принять то же и для теплопроводности; соответственно этому он вновь переработал всю свою теорию газов, а также и теорию теплопроводности с новой точки зрения, допустив, что между молекулами действует отталкивательная сила, обратно пропорциональная пятой степени расстояния¹. Однако выведенные отсюда числа оказались столь же мало согласными с экспериментальными данными, как и числа, полученные с помощью формул Клаузиуса². Правда, относительные величины теплопроводности газов, исчисленные по формулам Клаузиуса и Максвелла, оказались в достаточном; согласии с относительными величинами, полученными из непосредственных измерений, по крайней мере, для простых газов, и это совпадение правильно рассматривалось как триумф кинетической теории газов; но по сравнению с абсолютными величинами, полученными из опытов, числа Максвелла оказались как раз настолько преувеличенными, насколько числа Клаузиуса преуменьшенными.

Опытным путем теплопроводность газов была впервые установлена Магнусом в 1860 г.³, но вполне определенно он доказал ее существование только для *водорода*. Если герметически закрытый полый сосуд извне нагревать равномерно со всех сторон, то находящийся посередине его термометр будет нагреваться как под влиянием излучения, так и под влиянием теплопроводности заключенного в сосуде газа; воздушных же токов при равномерности нагревания не будет. Так как нет газа совершенно теплопрозрачного, то нагревание термометра в сосуде под влиянием лучеиспускания будет слабее, чем в вакууме, и это

¹ „Philosophical Magazine" (4), XXXV, стр. 214, 1868.

² По теории Клаузиуса получается формула $l = \frac{5}{4}\eta c$, по теории Максвелла $l = \frac{5}{3}\eta c$; О. Мейер („Kinet. Theor. d. Gase", стр. 331) позднее вывел из прежней, теории Клаузиуса и Максвелла, пользуясь максвелловским законом распределения скоростей, формулу $l = 1,53\eta c$.

³ „Pogg. Ann.", СХІІ, стр. 497, 1861 (доложено в Берлинской академии наук 30 июля 1860 г. и 7 февраля 1861 г.). Магнус был, по собственным его словам, наведен на это исследование наблюдением Грове („Philosophical Magazine" (3), XXVII, стр. 445 и XXXV, стр. 114, 1845 и 1849; также „Pogg. Ann.", LXXVIII, стр. 366), который заметил, что платиновая проволока накаливается гальваническим током в водороде менее сильно, чем в атмосферном воздухе или в другом газе. Поггендорф и Клаузиус в свою очередь отметили, что эти явления относятся к тому же разряду явлений, как и интересные наблюдения Дюлонга и Пти (см. 1 выпуск настоящей части, стр. 210) над охлаждением тел в различных газах. Замечательно высокая теплопроводность водорода рассматривалась, конечно, как доказательство его металлической природы, поэтому исследователи были склонны из всех газов сохранить теплопроводность только за одним водородом.

ОПЫТНОЕ УСТАНОВЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ГАЗОВ 309

ослабление может быть в большей или меньшей степени нейтрализовано или даже превращено в более сильное нагревание лишь теплопроводностью заключенного в сосуде газа. В последнем случае теплопроводность газа выявляется с полной несомненностью. Наполняя сосуд различными газами и нагревая его извне все время совершенно одинаковым образом, Магнус получил для термометра, помещенного посредине сосуда, следующие относительные повышения температуры:

Вакуум	100	Болотный газ	80,3
Атмосферный воздух	82,0	Маслородный газ	76,9
Водород	111,1	Аммиак	69,2
Угольная кислота	70,0	Синерод	75,2
Окись углерода	81,2	Серная кислота	66,6 ¹
Закись азота	75,2		

Этими опытами теплопроводность водорода была бесспорно доказана; у других же газов Магнус предполагал преобладание тепловой непрозрачности над существующею, быть может, теплопроводностью, что согласовалось также с тем фактом, что при разрежении газов в сосуде указанные температуры повышались. В 1871 г. Нарт² вернулся к методу охлаждения Дюлонга и Пти и на основании наблюдений над временем охлаждения сосуда, наполненного нагретым льняным маслом, в пустоте, водороде, атмосферном воздухе, азоте и угольной кислоте определил относительную теплопроводность этих газов. Стефан³ усовершенствовал этот способ, и ему удалось получить абсолютные величины постоянных теплопроводности. После многократных попыток он остановился на металлическом сосуде с двойными стенками, внутренняя полость которого служила *воздушным термометром*; пространство между стенками заполнялось исследуемым газом. Перед каждым опытом этот прибор во всех своих частях приводился к одинаковой (комнатной) температуре, после чего его погружали в сосуд со снегом и льдом и затем наблюдали ход термометра. Так как влияние лучеиспускания при этом, по Стефану, ничтожно, то количество тепла, исходящего от внутренней стенки, зависит только от разности температуры, расстояния и величины стенок, равно как от теплопроводности газа, заполняющего пространство между стенками. Таким образом, из этого опыта можно путем исчисления получить величину теплопроводности газа. Указанным методом Стефан получил для абсо-

¹ „Pogg. Ann.“, CXII, стр. 511.

² „Pogg. Ann.“, CXLII, стр. 123, 1871. — F. Nart (родился в 1844 г.) — профессор физики в Мюнхене.

³ „Wiener Sitzungsber.“, LXV, 2 отдел, стр. 45, 1872; LXXII, 2 отдел, стр. 69, 1876. О соответствии найденных величин теплопроводности теоретическим расчетам Стефан говорит следующее: „Немногие из физических теорий могут представить столь блестяще подтвердившиеся теоретические определения; поэтому динамическую теорию газов можно, пожалуй, считать одною из наиболее прочно установленных в физике. Другой закон, вытекающий из той же теории, а именно, независимость теплопроводности газа от его плотности, тоже с полной достоверностью подтвердился на опыте“. — J. Stefan (родился в 1835 г.) — профессор физики Венского университета.

310 ВЕЛИЧИНЫ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ГАЗОВ

лютой проводимости воздуха число 0,0000558, а для относительных величин проводимости других газов — следующие числа:

Атмосферный воздух . . .	1,000	Окись углерода	0,981
Угольная кислота	0,642	Кислород	1,018
Окись азота	0,665	Болотный газ	1,372
Маслородный газ	0,752	Водород	6,718

Все дальнейшие измерения производились с помощью подобных же приборов и по тому же методу. Винкельман ¹ получил этим путем числа, достаточно согласные с стефановскими; а Кундт и Варбург ² лишь незначительно отклоняющиеся от них.

О. Е. Мейер сопоставил наблюденные величины с теми, которые он вычислил по своей формуле $l=1,53 \cdot \eta \cdot c$, и получил следующую таблицу ³:

Абсолютные величины теплопроводности

	Вычислен- ные	Наблюден- ные	Исследователи
Атмосферный воздух . . .	0,0000492	0,0000480	Кундт и Варбург
		0,0000525	Винкельман
		0,0000558	Стефан
Водород	0,0003497	0,0003324	Винкельман
Окись углерода	0,0000490	0,0000510	"
Азот	0,0000491	0,0000524	"
Кислород	0,0000502	0,0000563	"
Угольная кислота	0,0000407	0,0000317	"
Закись азота	0,0000425	0,0000363	"
Болотный газ	0,0000829	0,0000647	"
Маслородный газ	0,0000542	0,0000414	"

Таблица показывает, что для всех газов с двухатомной частицей вычисленные и наблюденные величины достаточно хорошо совпадают, тогда как для всех газов с более высокой атомностью молекул исчисленные величины больше наблюденных. По этому поводу Больцман высказал чрезвычайно важную идею, приняв в расчет возможность

¹ „Pogg. Ann.", CLVI, стр. 497, 1875; CLVII, стр. 497, 1876; CLIX, стр. 177, 1876. Обе последние работы поставили себе целью, главным образом, выяснить влияние температуры на теплопроводность. В первой своей работе Винкельман еще находил, что его результаты вполне соответствуют закону температур Максвелла („Pogg. Ann.", CLVII, стр. 549), однако во второй, приняв во внимание изменение теплоемкости с температурой, он пришел к выводу, что температурный коэффициент теплопроводности не соответствует ни выводам Максвелла, ни выводам Клаузиуса.

² „Pogg. Ann.", CLVI, стр. 177, 1875.

³ „Kinetische Theorie der Gase", стр. 194, Breslau 1877.

ИНТРАМОЛЕКУЛЯРНОЕ ДВИЖЕНИЕ 311

и влияние *интрамолекулярных движений*, выполняемых атомами внутри молекул независимо от движения последних. Тотчас же после появления работы Стефана в 1872 г.¹ он обратил внимание на то обстоятельство, что теплопроводность газов вообще не может быть точно исчислена теоретическим путем, так как без знания внутренней структуры молекул нельзя на основе теории газов определить, каким образом интрамолекулярное движение передается от частицы к частице. По его словам Максвелл, который при своем исчислении теплопроводности не принял в расчет интрамолекулярных движений, тем самым молча допустил, что часть теплового движения, переходящая на составные части молекул, на атомы, распространяется с такую же скоростью, как молекулярное движение; это предположение просто, но, тем не менее, оно мало вероятно; преувеличенные числа, полученные Максвеллом, говорят, по мнению Больцмана, за то, что интрамолекулярное движение участвует в проведении теплоты в меньшей степени, чем это должно было бы быть согласно сделанному допущению. Поэтому спустя несколько лет Больцман снова вернулся к этому вопросу² и на основании опубликованных уже тогда измерений теплопроводности газов он решил обратную задачу, а именно он определил, какие относительные доли в процессе проведения тепла приходятся на *поступательное движение* молекул и на *интрамолекулярное движение*. Если допустить, что последнее имеет такую же скорость, как и поступательное движение молекул, можно путем исправления формулы Максвелла получить для теплопроводности газов выражение $I_{total} = \frac{5}{2} \eta c$; если же допустить, что теплопроводность осуществляется исключительно поступательным движением молекул, получается:

$$I_{prog} = \frac{15(\gamma - 1)}{4} \eta c,$$

где γ обозначает отношение удельных теплоемкостей при постоянном давлении и при постоянном объеме. Из сравнения полученных таким путем величин с числами, определившимися в результате опытных измерений, он получил формулу:

$$I = \frac{3}{13} I_{total} + \frac{10}{13} I_{prog},$$

¹ „Wiener Sitzungsber.“, LXVI, 2 отдел, стр. 333, 1872. Здесь Больцман говорит: „Тем не менее, это (т. е. уточнение формулы теплопроводности Максвелла путем принятия в расчет интрамолекулярного движения) представляется мне очень произвольным, так как, если ввести в расчет интрамолекулярное движение каким-либо иным образом, можно получить для постоянной теплопроводности, значительно отклоняющиеся величины. Поэтому до более близкого ознакомления с интрамолекулярным движением точное исчисление этой постоянной теоретическим путем представляется мне невозможным“. *О связи между внутренней работой при повышении температуры газов и числом атомов в газовых молекулах* Больцман представил работу Венской академии наук уже 28 ноября 1867 г. („Sitzungsber. der Wiener Akad.“, 2 отдел, LVI, ноябрьский номер 1867, Отдельный оттиск стр. 1—9).

² „Wiener Sitzungsber.“, LXXII, стр. 458, 1876 г.; „Pogg. Ann.“, CLVII, стр. 457

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ

которая дает для всех газов постоянные теплопроводности, достаточно хорошо согласующиеся с данными измерений. Позднее О. Е. Мейер¹ получил аналогичную формулу, приняв для распространения кинетической энергии молекул упомянутое выше уравнение $l=1,53\eta c$, а для проведения атомной энергии выведенное им из диффузии уравнение $l=\eta c$. Правильность построенной таким образом формулы он показал на следующей таблице:

Теплопроводность

	Абсолютная		Относительная	
	вычислен- ная	наблюден- ная	вычис- ленная	наблю- денная
Угольная кислота . . .	0,0000328	0,0000317	0,667	0,642
Закись азота	0,0000342	0,0000363	0,635	0,665
Аммиак	0,0000524	—	1,064	0,917
Болотный газ	0,0000677	0,0000647	1,377	1,372
Этилен	0,0000422	0,0000414	0,858	0,752 ²

В 1881 г. Л. Гретц³ снова пришел к иным результатам, оспаривая главным образом винкельмановское определение температурного коэффициента теплопроводности. Согласно его измерениям процесс проведения тепла воздухом, водородом, а при низких температурах и угольной кислотой заключается только в передаче энергии поступательного движения, *доля же интрамолекулярной энергии в этом процессе неизмеримо мала*; формула Клаузиуса с постоянной О. Е. Мейера, т. е. $l=1,530\eta c$, вполне пригодна для названных газов. И для зависимости теплопроводности от температуры закон Клаузиуса верен; если и бывают отклонения, то они заключаются лишь в том, что проводимость изменяется медленнее, чем в отношении корней квадратных из температуры. Хотя Винкельман сначала отстаивал правильность своих выводов⁴, но в позднейших своих работах он тоже считает этот вопрос еще не созревшим для окончательного разрешения.

Согласно вышесказанному теплопроводность газов двояким образом связана с их *удельными теплоемкостями*, поэтому она разделяет все трудности, связанные с определением последних. С одной стороны, согласно формуле $l=1,53\eta c$, теплопроводность прямо пропорциональна *удельной теплоемкости при постоянном объеме*; с другой стороны — *отношение между кинетической энергией молекул и интрамолекулярной энергией атомов*, принимающими в теплопроводности, по-видимому,

¹ „Kinetische Theorie der Gase“, стр. 197, Breslau 1877.

² Таблица исчислена по формуле $l = \frac{1,53 \cdot E + \mathfrak{E}}{E + \mathfrak{E}} \eta c$, где E и \mathfrak{E} обозначают молекулярную и атомную энергии.

³ „Wied. Ann.“, XIV, стр. 232, 1881. — L. Gratz — профессор Мюнхенского университета.

⁴ „Wied. Ann.“, XIV, стр. 541, 1881.

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ 313

неодинаковое участие, может быть выведено лишь из *отношения между обеими удельными теплоемкостями*. Клаузиус уже в 1859 г., в своем основном сочинении по механической теории газов, выразил отношение между всей энергией молекул H и энергией K чисто поступательного движения молекул при помощи формулы:

$$\frac{K}{H} = \frac{3}{2} \cdot \frac{C - c}{c},$$

где C обозначает удельную теплоемкость при постоянном давлении, а c — при постоянном объеме. Если принять, что у одноатомных молекул вся энергия сводится к энергии поступательного движения, то для таких газов должно быть $K/H=1$ и, следовательно, $(C-c)c=2/3$ или $C/c=5/3$. И, действительно, Кундт и Варбург¹ путем измерений над ртутными парами (молекула которых одноатомна) подтвердили правильность этого отношения, а вместе с тем и формулу Клаузиуса. Для многоатомных частиц определение отношения K/H связано с большими трудностями, так как удельная теплоемкость при постоянном объеме c не определена и необходимая для ее вычисления величина отношения $C/c=k$ точно определена лишь для немногих газов. На основании новейших измерений представляется весьма вероятным, что для всех многоатомных молекул k меньше $5/3$ и что с возрастанием числа атомов оно убывает². Некоторое время думали, что отношение K/H , а, следовательно, и величина k одинаковы, по крайней мере, для всех молекул с равным числом атомов, однако опыты Штрекера³, проведенные им по указанию Кундта над хлором и парами брома и йода, сделали мало вероятным и это предположение. Штрекер нашел:

	k .	$\frac{K}{H}$
Для хлора	1,323	0,48
„ брома	1,293	0,44
„ йода	1,294	0,44

между тем как вообще у двухатомных молекул для k не находили числа ниже 1,400 и для K/H ниже 0,60. Такая изменчивость отношения K/H , вероятно, объясняется соображением, приведенным О. Е. Мейером уже в 1877 г. в его «Кинетической теории газов» (стр. 97), что

¹ „Pogg. Ann.", CLVII, стр. 353, 1876.

² См. также О. Е. Meyer, „Kinetische Theorie der Gase", стр. 94.

³ „Wied. Ann.", XIII, стр. 20, 1881.

314 ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ТЕМПЕРАТУРА

энергия атомов зависит, быть может, от химического средства соответствующих веществ.

О зависимости *удельных теплоемкостей и их отношения от температуры* можно сказать, конечно, еще и того меньше. Большею частью принимали, что такой зависимости не существует; однако Э. Видеман в 1876 г. показал ¹ на различных многоатомных молекулах, как, например, угольной кислоте, этилене, закиси азота и аммиаке, явное *повышение удельной теплоемкости с температурой* ². В таком случае, прежде всего в газах с многоатомными молекулами теплопроводность должна была бы изменяться с температурой не только вследствие изменения коэффициентов внутреннего трения, но также и вследствие изменения удельной теплоемкости, в силу чего *зависимость теплопроводности от температуры не могла бы быть точно представлена ни законом Клаузиуса, ни законом Максвелла*, как это и было отмечено выше.

Любопытный случай перехода света в механическую силу или, по крайней мере, непосредственного превращения лучистой теплоты в движение материальной массы был открыт в 1873 г. Круксом. Впрочем, непосредственное действие тепловых лучей на легко подвешенные тела было уже, по-видимому, замечено давно. В конце сороковых годов Дебре ³ занялся этим вопросом, желая разобраться в том, насколько могут влиять на стрелку гальванометра термические, не электрические причины. Он заметил, что отклонение получается уже при наложении руки на колпак гальванометра или даже при приближении ее к последнему; более сильные отклонения получались от приближения горячей свечи или раскаленного угля; менее сильные, но все-таки заметные отклонения он получал даже ото льда. Получив такие же явления на иглах из бумаги, соломы и пр., Дебре высказал предположение, что эти отклонения вызываются непосредственно лучистой теплотой. Однако Пуллье ⁴ по этому поводу тотчас же отметил, что подобные явления уже давно известны и что их объяснение не требует допущения какого-либо нового вида действия теплоты. По его словам уже в 1751 г. Ж. Э. Бертье ⁵ показал в присутствии Реомюра, ле-Руа, Нолле, Бугэ и других, что длинные соломенные иглы, подвешенные в ящике на шелковой нити, отклоняются при приближении к ящику пламени. Далее, в 1825 г. Френель ⁶ заметил, что две пластинки, подвешенные под ко-

¹ „Pogg. Ann.“, CLVII, стр. 1, 1876. Уже Реньо установил, что у паров большинства жидкостей удельная теплоемкость изменяется с температурой.

² Изменение удельной теплоемкости с температурой, по Видеману, объясняется, может быть, тем, что при нагревании газа происходит постепенно диссоциация, заключающаяся в расслаблении связи между отдельными атомами, на что и расходуется часть теплоты.—Eilhard Wiedemann (родился в 1852г.)— профессор химии в Эрлангене.

³ „Sur la déviation de l'aiguille aimantée par l'action des corps chauds et froids“, „Comptes rendus“, XXIX, стр. 225, 1849.

⁴ „Comptes rendus“, XXIX, стр. 245.

⁵ „Sur l'attraction et la répulsion des corps terrestres sans être électrisés“, „Mém. de l'Ac. des sc.“ 1751. Аналогичные наблюдения сделал Мичелль при помощи прибора, устроенного наподобие крутильных весов, описанного в „Истории оптики“ Пристлея („Geschichte der Optik“, нем. пер. 1776г., стр.282).

⁶ „Bull. de la Soc. Philomath.“, стр. 84, 1825.

РАДИОМЕТР. ПЕРВЫЕ ОПЫТЫ КРУКСА 315

локолом воздушного насоса на коконных нитях, взаимно отталкиваются, если вблизи их сконцентрировать солнечные лучи с помощью выпуклой чечевицы. Подобные же случаи притяжения и отталкивания наблюдал в 1826 г. Лебайи, а в следующие годы Ж. Фр. Сэжэ¹. Наконец, сам Пуллье² еще в 1829 г. опубликовал ряд аналогичных опытов и дал для них удовлетворительное объяснение. А именно, если в закрытом ящике со стеклянным окошком подвесить друг над другом на волосках три соломенные иглы и поставить свечу перед окошком, то верхняя и нижняя иглы отклоняются в противоположные стороны, а средняя беспорядочно отклоняется то в одну сторону, то в другую. Отсюда, очевидно, следует, что эти отклонения и движения вызываются токами воздуха, возникающими вследствие нагревания. Дебре³ в свое оправдание ответил на это, что он и не думал приписывать этого явления какому-либо неизвестному действию теплоты; он лишь хотел сказать, что теплота является здесь, *в конечном счете*, причиной данного явления, так как это явление можно объяснить не только воздушными токами, но также изменениями в гигроскопическом или же магнитном состоянии⁴ под влиянием теплоты.

В таком положении находился этот вопрос до тех пор, пока Крукс в 1873 г. не опубликовал своих наблюдений, которые создали большие трудности для теории воздушных потоков⁵. Подвешивая в бутылки легкую соломинку, с шариками из бузиновой сердцевины, стекла, платины, дерева и пр. на конце, он наблюдал, что пока бутылка оставалась наполненной воздухом маленький маятник притягивался нагретыми телами; при выкачивании же воздуха притяжение мало-помалу ослабевало и затем заменялось отталкиванием. От холодных тел получался противоположный эффект; так, в пустоте шарики притягивались льдом. Крукс перебирает все возможные объяснения этих притяжений и отталкиваний, — воздушные токи, электрические силы и, наконец, испарение и сгущение воды, — совершенно так, как это сделал раньше Дебре. Но он отменяет все эти гипотезы и со своей стороны дает следующее объяснение: *«У меня создается впечатление, что отталкивание, сопровождающее лучеиспускание, вызывается непосредственно ударами волн по поверхности движущейся массы... Толкают ли эфирные волны непосредственно движущееся вещество, или же на той загадочной пограничной поверхности, которая отделяет газовую массу от твердой, лежат слои сгущенного газа, которые и воспринимают эти толчки и затем передают их лежащим позади них слоям, — это вопросы, решение которых должно послужить предметом будущих исследований»*. Одновременно с Круксом вопросом о термических притяжениях и отталки-

¹ „Bull. de Ferrussac“, VIII, стр. 287, 1827; IX, стр. 87, 167, 239, 1828.

² „Ann. de chim. et de phys.“ (2), XL, стр. 196, 1829.

³ „Comptes rendus“, XXIX, стр. 273, 1849.

⁴ См. стр. 298 первого выпуска 3-й части настоящей работы.

⁵ „Philosophical Magazine“ (4), XLVIII, стр. 65 и 81, 1874; „Proc. of the Roy. Soc.“, XXII, стр. 37, 1874; „On the action of heat on gravitating masses“, „Proc. of the Roy. Soc.“, XXII, стр. 373, 1875. Также „Nature“, XI, стр. 494. — William Crookes (родился в 1832 г.) — химик и физик, жил в качестве частного лица в Лондоне. Был приверженцем спиритизма.

316 ТЕОРИЯ МОЛЕКУЛЯРНЫХ УДАРОВ

ваниях занимался А. Бергнер¹, который тоже выводил движение весоных масс непосредственно из движений эфира. По его мнению, и то тело, которое отдает тепло, и то, которое его получает, притягиваются в направлении поглощенных или излученных лучей; отталкивание же происходит вследствие столкновения противоположных эфирных волн. Но интерес к этому явлению стал всеобщим, когда Крукс устроил свою *световую мельницу*² или, как он сам назвал этот прибор, *радиометр*. Это изобретение тотчас же вызвало такое множество подражаний, видоизменений, усовершенствований, столько научных исследований и пояснительных гипотез, как едва ли какое-либо другое открытие первостепенной важности. Тем не менее, надежды, которые были возложены на этот прибор, не вполне оправдались. Движение крыльев в радиометре Крукс теперь приписал уже не прямому действию эфирных волн, а в соответствии с новой теорией газов — удару прямолинейно движущихся молекул оставшегося еще в радиометре воздуха, как это уже раньше предполагали Тэт и Дюар³. Согласно этому новому объяснению Крукса, частицы воздуха, попадающие на закопченные поверхности крыльев и отражающиеся от них, частично отталкивают вновь притекающие частицы газа, так как, будучи более нагретыми, они обладают большею живою силою. Таким образом, на нагретые стороны крыльев попадает молекул меньше обычного, но зато отдача при их отскакивании больше, так как они более нагреты; поэтому равновесие может все-таки сохраняться. Но это продолжается лишь до тех пор, пока плотность газа еще настолько велика, что средняя длина пути молекул исчезающе мала по сравнению с размерами сосуда. Когда же этого условия больше нет налицо, когда вследствие разрежения воздуха свободные пути молекул удлинились и достигли известной величины, тогда, наоборот, свободные пути оказываются значительно больше размеров сосуда и сила отскакивающих молекул частью или даже полностью уничтожается на поверхности стенок сосуда, и поток молекул, несущихся по направлению к нагретой поверхности крыльев, не будучи более ослаблен встречным потоком, заставляет крылья вертеться в направлении движения потока. Большое количество физиков

¹ „Die Anziehung und Abstossung durch Wärme und Licht und die Abstossung durch Schall“, Boizenburg 1874; реферат в „Klein's Revue“, III, стр. 530.

² „Proc. of the Roy. Soc.“, XXIII, стр. 377, 1875; XXV, стр. 136 и 304, 1877; XXVII, стр. 29: „On repulsion resulting of radiation“. Также „Nature“, XII, стр. 58 и 125; XIII, стр. 391, 450 и 489; XVI, стр. 12. Подробно „Phil. Trans.“, стр. 243, 1878. По замечанию Бертольда („Pogg. Ann.“, CLVIII, стр. 483) Меран уже в 1747 г. описал („Mém. de l'Acad. de Par.“, стр. 630, 1747) световую мельницу в следующих выражениях: „Это горизонтально расположенное железное колесо, около 3 дюйм. диаметром, с шестью спицами, на конце каждой спицы имеется маленькое косо поставленное крыло; ось этого колеса, тоже железная, верхним своим концом держится только за железную намагниченную палочку. Колесо вместе со своею осью весит только 30 гран“. Однако колесо под влиянием сконцентрированных чечевицей солнечных лучей не вращалось правильно, но изменяло направление своего движения. Эти неправильности Меран приписал токам воздуха и для более детального исследования хотел поместить колесо в пустоте, но отказался от этого опыта вследствие технической трудности его выполнения.

³ „Nature“, XII, стр. 217, 1875.

ТЕОРИЯ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ 317

присоединилось к этому объяснению, причем многие из них усмотрели в радиометрических явлениях «неожиданное и замечательное подтверждение новейшей теории газов»¹. Однако другие физики, работавшие с видоизмененными приборами и наблюдающие это явление в несколько ином виде, признали объяснение Крукса неправильным или, во всяком случае, недостаточным и выдвинули другие теории, которые, по их мнению, лучше объясняют это явление. Так, Неезен² снова выступил с защитой более старой точки зрения, согласно которой *воздушные потоки*, поднимающиеся с поверхности нагретых крыльев, вызывают попятное движение этих крыльев. В подтверждение своего объяснения он, прежде всего, пользуется радиометром, в котором крест помещен не симметрично (эксцентрично). «Если, — говорит он, — вращение мельницы происходит вследствие того, что воздух, нагреваясь на поверхностях, поднимается с них и увлекает за собою новые количества воздуха, то с течением времени на эти явления должны оказывать влияние и стенки сосуда радиометра, так как и они нагреваются, значит и на них должен происходить тот же процесс, что и на крыльях. Если же, наоборот, вращение представляет собою только явление реакции, то нет никакой причины для подобного влияния неподвижных стенок. После этого нетрудно понять, что возможное влияние стенок легко будет обнаружить, если радиометр подвесить асимметрично внутри сосуда»³. И Иеезен установил; что на таком радиометре поначалу, вследствие более сильного нагревания закопченных поверхностей, вращение происходит в обычном направлении; но когда стенки прибора постепенно нагреваются, оно может замениться противоположным. Даже при не зачерненных и совершенно равных крыльях, когда нельзя предполагать неравномерности их нагревания, эксцентрические радиометры приходят во вращение от нагревания стенок — даже при том условии, когда крылья защищены от прямого действия лучей света и тепла и нагревается лишь оболочка прибора. На этом основании Иеезен был склонен приписать потокам воздуха в радиометре решающую активную роль в данном явлении. Однако никто из физиков не присоединился к этому мнению, а Целльнер, в своей выдающейся работе о радиометре⁴, находит, что это объяснение так же неудовлетворительно, как и приведенные выше.

Световые лучи, — говорит Целльнер в указанной работе, — падая на какую-либо поверхность, действительно производят на нее отталкивательное действие, но давление света, по исчислениям Максвелла, составляет всего 0,0000000882 фунта на квадратный фут⁵, между тем

¹ Ж. Сале в „Comptes rendus“, LXXXIII, стр. 968, 1876 говорит: „Прибор Крукса утратил свой характер таинственности. Но в то же время современная теория газов получила неожиданное и замечательное подтверждение“.

² „Pogg. Ann.“, CLVI, стр. 144, 1875; CLX, стр. 143, 1877.

³ „Pogg. Ann.“, CLX, стр. 144.

⁴ „Pogg. Ann.“, CLX, стр. 154, 296 и 459, 1877.

⁵ Максвелл говорит („Treatise on Electricity and Magnetism“, London 1873, немецкий перевод, т. II, стр. 548, Berlin 1883): „Если допустить, что сильный солнечный свет развивает на одном квадратном метре 124,1 кг-м энергии в секунду, то в одном кубическом метре солнечных лучей должно содержаться $\frac{124}{300\ 000\ 000}$ или 0,00000041 кг-м энергии. Тогда среднее давление на площадь в один

318 ТЕОРИЯ ИСПАРЕНИЯ

как Крукс установил, что на его радиометр действует сила, в 100 000 раз большая. Электрическими силами радиометрические явления, по мнению Целльнера, тоже не могут быть объяснены, так как эти движения происходят и при замене крыльев радиометра стеклянными полушариями, да и нельзя себе представить такого распределения электричества в приборе, которое давало бы непрерывное движение¹. Воздушные токи тоже не могут быть причиной движения радиометра, так как при замене крыльев незаконченными полушариями последние при вращении движутся вогнутыми сторонами чашек вперед, тогда как в анемометрах подобного же устройства движение под действием воздушных токов всегда происходит в обратном направлении. Против теории Крукса Целльнер, прежде всего, выдвигает то соображение, что *основная предпосылка этой теории о значительном перевесе длины свободных путей газовых молекул над размерами сосуда ни в коем случае не соответствует действительности*. Тэт и Дюар принимали, что плотность газа в радиометре составляет $\frac{1}{400\,000}$ нормальной, т. е. что давление составляет только 0,00019 мм ртути, в соответствии с чем средняя длина пути молекул должна была равняться 400 мм. Но Р. Финкенер² в своих опытах определяет наиболее низкое давление в 0,025 мм, а такому давлению соответствует длина свободного пути всего в 3 мм. Да и сам Крукс определяет давление в обыкновенных радиометрах в 0,19 мм, которому соответствует длина пути всего только в 0,37 мм. Эти длины путей далеко не достигают размеров сосудов, доходящих до 100 мм; а между тем, согласно теории Крукса, они должны были бы быть значительно больше последних, если верно допущение Крукса, что живая сила отраженных молекул передается не другим молекулам, а стенкам сосуда. Кроме того, в полости радиометра помимо разреженного газа имеются еще пары ртути, величины молекул которой гораздо больше, а длины путей короче, чем у газов; это опять-таки должно препят-

квадратный метр, перпендикулярную к направлению лучей, должно составить 0,00000041 кг-м. Так как это давление должно действовать только на освещенную сторону предметов, то последние должны, по-видимому, перемещаться в направлении распространения света. Сконцентрированный электрический свет произвел бы, вероятно, еще более сильное давление, поэтому *возможно, что лучи такого света, падая на тонкую металлическую пластинку, подвешенную в пустоте, могут дать механический эффект, доступный для наблюдения*".

¹ Тем не менее, многие физики, как Челлис, П. Дельсо, де-Фонвиелль, В. Ганкель и др., высказались в пользу электрической теории радиометра. Неезен в конце упомянутой уже работы („Pogg. Ann.", CLX, стр. 153) говорит: „В заключение следует еще отметить, что радиометр, как это уже было замечено другими, очень чувствителен к электризации. При нагревании стеклянный колпак прибора, по-видимому, несколько наэлектризовывается и благодаря этому тоже каким-то образом влияет". Но Мунке уже в 1830 г. предложил электрическую теорию тепловых притяжений и отталкиваний („Pogg. Ann.", XVIII, стр. 239): „Загадочные вращения коромысла в крутильных весах Кулона, о которых я вам сообщал осенью, представляют собою не что иное, как действие термоэлектричества (я это признаю, несмотря на то, что раньше был склонен исключить это влияние) и аналогичны тем явлениям, которые по Марку Уатту („Edinb. Journ. of Science", 1828) должны вызываться светом, а по Пфаффу („Schweigger's Journ.", LVI) — теплотой".

² „Pogg. Ann.", CLVIII, стр. 573.

ствовать возникновению тех условий, которых требует кинетическая теория газов. По всем этим основаниям Целльнер считает единственно возможной *эмиссионную теорию*, или *теорию испарения*, впервые высказанную О. Рейнольдсом ¹, а затем аналогичным образом разработанную Гови ². Согласно этой теории движение крыльев радиометра вызывается разрежением и сгущением приставшего к их поверхности газа. А именно, когда зачерненные поверхности крыльев нагреваются поглощенными ими тепловыми лучами, с них поднимаются, по крайней мере, частично, сгущенные на них газы, и крылья благодаря отдаче начинают вращаться. Целльнер развивает дальше эту теорию; он возвращается к своей идее об испарении твердых тел при обыкновенной температуре и объясняет вращение радиометра не только истечением сгущенных на поверхности крыльев газов, но также и прямым испарением твердого вещества крыльев. «Вызванное эфирными колебаниями, — говорит он, — прямое или косвенное излучение с поверхности тел всегда сопровождается истечением материальных частичек в направлении лучей. Число, масса и скорость частиц, вылетающих в единицу времени, зависят от физических и химических свойств поверхности, от энергии и свойств истекающих лучей». Эмиссионную теорию он считает исчерпывающей, а следовательно, и правильной до тех пор, пока не будет доказано отсутствие в радиометре не только каких-либо паров, но и испаряющихся твердых тел. Однако и эта теория не могла одержать полной победы; наряду с ней продолжает существовать *кинетическая теория*, насчитывающая во всяком случае не меньшее число сторонников; возможно, что в каждой из этих теорий есть своя доля правды и что на движения радиометра влияет *много различных обстоятельств*. Для разрешения этого вопроса следует произвести еще много таких опытов, которые имели бы своей целью не столько видоизменение приборов и вызываемых при их помощи явлений, сколько точное определение общей зависимости этих движений от действующих причин, от проникающих в прибор эфирных волн, от свойства и формы крыльев и стенок сосуда, от рода находящегося в приборе газа и т. д. И действительно, в новейшее время работы с радиометром, правда, уменьшившиеся в числе, приняли именно такое направление.

После рассмотрения действия теплоты в области молекулярной физики нам следует еще упомянуть о *применении теории теплоты к космическим проблемам*, которое в это время сыграло не малую роль, и которое тоже очень характерно для новейшего развития физики. *Дискуссии по поводу второго начала теории теплоты* показали, что при относительно высоком уровне преобладающих средних температур над абсолютным нулем не вся, во всяком случае, теплота тел может быть превращена в другие формы энергии, и что в результате естественно протекающего процесса выравнивания разности температур запас способной к превращению теплоты должен постепенно все уменьшаться.

¹ О. Reynold's (профессор Owen's College в Манчестере). „On the force caused by evaporation and condensation at a surface“, „Nature“, X, стр. 174, 1874; „On attraction and repulsion resulting from radiation of heat“, „Nature“, XII, стр. 6, 1875.

² „Comptes rendus“, LXXXII, стр. 1410, 1876.

320 СОХРАНЕНИЕ ЭНЕРГИИ СОЛНЦА

Обобщение второго начала теории теплоты до степени общего принципа для всех форм энергии заставило распространить и эти выводы на все формы энергии, вследствие чего постепенное уменьшение всякой вообще способной к превращению энергии до нуля, т. е. конец всего существующего, представлялось с физической стороны совершенно неизбежным. Правда, против этой цепи умозаключений было сделано вполне обоснованное возражение, что в данном случае она применена к бесконечно большому числу членов и поэтому она заходит за пределы нашего познания. Однако ввиду того, что наша *солнечная система* представляет собою во вселенной до известной степени замкнутую систему с точки зрения превращения энергии, то выводы новой теории теплоты пытались применить к ней — с тем, чтобы определить скорость выравнивания в ней энергии или, к чему в большинстве случаев эта проблема сводилась, чтобы показать, что эта скорость не столь велика. Так как, несомненно, все процессы в солнечной системе имеют своим источником разности теплоты между солнцем и планетами и, конечно, должны иссякнуть после уничтожения этих разностей, то вся проблема сводилась к вопросу, *каким образом сохраняется деятельная энергия солнца, несмотря на постоянную потерю им теплоты.*

По Гершелю солнце излучает ежечасно 18 000 000 тепловых единиц на каждый квадратный фут своей поверхности, и, тем не менее, никогда еще не удавалось подметить ослабления солнечной теплоты. Для возмещения такой потери тепла следовало бы каждые 36 час. сжигать на солнце массу угля величиною в нашу землю. Если бы само солнце состояло из угля, то сгорание его могло бы покрыть тепловые потери вследствие изучения только в течение примерно 5000 лет. Отсюда следует, что солнце нельзя себе представлять в виде сгорающего тела. Мысль Роберта Майера, высказанная им в 1848 г. в его «Динамике неба», что потери солнечной энергии восполняются ударами падающих на солнце метеорных масс, была уже изложена раньше. Вскоре затем Уотерсон и Томсон более подробно развили эту теорию. Согласно Уотерсону железный аэролит, упавший на солнце с очень большого расстояния, должен был бы при падении нагреться на $1\,800\,000\,000^{\circ}\text{F}$ ¹. По У. Томсону² падение на солнце Меркурия покрыло бы его тепловые потери за 6 лет 214 дней; падение Венеры — за 83 года 227 дней; нашей земли — за 94 года 303 дня; падение же Юпитера покрыло бы расход солнца за 32 240 лет. Эти числа говорят в пользу данной теории, но против нее возражают, что она для объяснения возмещения всей тепловой потери солнца предполагает наличие повсюду во вселенной такой массы метеоритов, которая не могла бы не повлиять на движения планет и остаться до сих пор незамеченной. Поэтому У. Томсон сделал дополнительное предположение, что метеориты не рассеяны в пространстве равномерно, а находятся лишь вблизи плоскости солнечного экватора, где они и вызывают явления зодиакального света. Но и этого оказалось недостаточно для устранения всех возражений, тем более что согласно теории Майера и Томсона масса солнца след-

¹ „Athenaum“, 1853; „Philosophical Magazine“ (4), XIX, стр. 338, 1860.

² „Edinb. Trans.“, XXI, стр. 57 и 63, 1857 (доложено в 1854 г.).

СОХРАНЕНИЕ ЭНЕРГИИ СОЛНЦА 321

ствие падения метеоритов должна была бы увеличиваться, а между тем этого никто не замечал. Новая гипотеза, удачно дополняющая предшествующую, была предложена около этого же времени в популярной лекции Гельмгольцем ¹. Если согласно гипотезе Лапласа солнце, как и вся его система, образовалась в результате сжатия туманного пятна и если это сжатие продолжается до сих пор, то все частицы солнца продолжают падать к центру, живая сила их движения превращается в теплоту и, таким образом, возмещает потери, которые солнце несет вследствие излучения. Приняв удельную теплоту туманной материи равной удельной теплоте воды, Гельмгольц вычислил повышение температуры этого светила, соответствующее уплотнению первичной туманной массы до объема нынешнего солнца, и нашел, что это повышение составляет 28 611 000°; кроме того, он показал, что сжатия солнца на $\frac{1}{10\ 000}$ его нынешнего диаметра было бы достаточно для покрытия его тепловых потерь более чем за 2000 лет. В новейшее время К. В. Сименс выступил со следующим возражением против этой теории. Если даже допустить, что при сжатии всей массы солнца действительно развивается такое количество тепла, то едва ли можно допустить, чтобы все оно могло достигнуть поверхности солнца с такою скоростью, которая была бы достаточно для полного покрытия его тепловых потерь. На этом основании он придумал собственную теорию, основанную, главным образом, на возможности обратного получения солнцем из мирового пространства излученной им теплоты ². Из всего количества излучаемой солнцем теплоты наша земля получает лишь одну 2250-миллионную долю, соответственно части небесной сферы, занимаемой землей, если на нее смотреть с солнца. Если, далее, принять (и это будет скорее много, чем мало), что количество тепла, падающего на другие планеты и планетоиды системы, увеличивает эту долю в 10 раз, то все-таки $\frac{224\ 999\ 999}{225\ 000\ 000}$ долей всей солнечной теплоты теряются в мировом пространстве бесполезно; другими словами, из энергии, излучаемой солнцем, примерно 200 млн. частей тратится зря и только одна часть применяется с пользой. Следует признать, что такая *расточительность* природы представляется просто неправдоподобной, поэтому всякая попытка снять с нее этот упрек не может не встретить нашего сочувствия. Для этого Сименс допускает, что *мировое пространство не пусто, а сплошь заполнено газами*, в пользу чего говорит и динамическая теория газов. Каждое небесное светило путем притяжения создает вокруг себя из этого вещества *атмосферу*, которая в *нижних слоях*, как и у нас на земле, состоит из *более тяжелых газов, азота, кислорода и угольной кислоты*, а в *самых верхних слоях* — преимущественно из *наилегчайшего газа, горючего водорода*. В пользу этого определенно говорит состав газа в падающих на землю мете-

¹ „Vortrage und Redan“, стр. 46 и 75. Braunschweig 1884; в лекции „Über «die Wechselwirkung der Naturkräfte»“, прочитанной 7 февраля 1854 г.

² „Über die Erhaltung der Sonnenenergie“. Eine Sammlung von Schriften und Discussionen von Sir Will. Siemens, перевод С. Е. Worms Berlin 1885. Первая статья датирована 1882 годом — Karl Wilhelm Siemens (1823—1883) — физик и инженер, руководитель Лондонского отдела фирмы Сименс и Гальске.

322 ТЕОРИЯ СИМЕНСА

оритах. Так, например, согласно работе, представленной Фляйтом Лондонскому королевскому обществу, содержание газа в *метеорных камнях* оказалось по своему объему в 6 раз больше объема самих камней, причем газ заключал в себе 17,66% азота, 31,88% окиси углерода, 0,12% угольной кислоты, 4,55% углеводорода и 45,79% водорода ¹. Если представить себе огромный *шар солнца* вращающимся в пространстве, наполненном такими веществами, то с его *экваториальных областей* вследствие *центробежной силы* будут выбрасываться в пространство громадные массы газов, а взамен их из того же пространства *через полюсы* будут притекать новые потоки газа. Последние, состоя преимущественно из *горючих газов*, будут сгорать на солнце, возмещать свою *теплотой сгорания* его тепловые потери и затем снова выбрасываться с экватора в пространство. При этом, конечно, все горючие газы небесного пространства должны были бы быть использованы и должны были бы уступить свое место продуктам сгорания, в результате чего источники солнечной теплоты должны были бы иссякнуть. Однако можно показать, что само солнце может снова восстановить эти продукты сгорания. Согласно Бунзену и Сен-Клер-Девиллю *разложение химических соединений* зависит не только от *температуры* (при высоких температурах соединения разлагаются), но также и от *давления*. По мнению Сименса ему удалось доказать на опыте, что в *круковских трубках* (при разрежении газа до $\frac{1}{1800}$ ат) *водяной пар* разлагается под действием *солнечных лучей* ² на свои составные части, *водород и кислород*. Следовательно, выброшенные солнцем продукты горения, попадая в области небесного пространства с чрезвычайно низким давлением, здесь разлагаются солнечными лучами на горючие вещества и затем, возвращаясь к солнцу, полностью возмещают излученную им энергию. Таким образом, в конечном счете, солнце безвозвратно теряет лишь ту часть излучаемой им энергии, которая поглощается планетами; но эта часть крайне ничтожна, она составляет лишь одну 200-миллионную долю всей той энергии, которую солнце излучает каждое мгновение ³ и которую мы до сих пор считали целиком потерянной.

Приведенные выше теории сохранения солнечной энергии не противоречат друг другу, не заключают в себе ничего невероятного и могут существовать рядом. В настоящий момент наиболее *действительной* из них является, пожалуй, теория Сименса, но наиболее широкой по своему охвату является, без сомнения, теория Майера, так как она соединяет нашу систему с остальными частями *вселенной* и обещает сохранение солнечной системы вплоть до всеобщего конца, т. е. до выравнивания всех видов энергии во всей вселенной.

¹ По Геггинсу спектральный анализ показывает, что ядро комет содержит почти те же газы („Erhaltung der Sonnenenergie", стр. 12).

² „Erhaltung der Sonnenenergie", стр. 17.

³ На многочисленные возражения против этой теории, и, прежде всего против предположения, что вселенная заполнена легким газом и что солнечный; свет диссоциирует водяной пар и угольную кислоту при низких температурах, Сименс отвечает в ряде статей, помещенных в его книге, содержание которых, однако, мы здесь лишены возможности изложить.

ИССЛЕДОВАНИЯ РИТТЕРА 323

С гипотезой Гельмгольца совпали применения механической теории тепла к космическим проблемам, сделанные А. Риттером в начале восьмидесятых годов ¹, и наметившие возможную связь между теориями Гельмгольца и Майера, Риттер, во-первых, показал, что, согласно новой теории теплоты, и *газовый шар может существовать как нечто обособленное, как небесное тело*, если только его состояние является *адиабатическим*, или, по крайней мере, приближается к последнему, т. е. если температура и плотность этого газового шара с удалением от центра изменяются по тому же закону, по которому они изменяются в восходящей и нисходящей массе газа, не получающей при своем движении теплоты извне и не отдающей ее наружу. *Для такого шара охлаждение при всяком излучении теплоты не является обязательным, так как теплота, образующаяся при сокращении этого шара, могла бы не только покрыть его потери при излучении, но еще и повысить его температуру.* Тогда в течение подобного процесса охлаждение вообще никогда бы не наступило; наоборот, сокращение газового шара до объема точки сопровождалось бы непрерывным повышением его температуры до бесконечности. Для того чтобы приблизиться к возможному процессу образования мировых систем, представим себе, что внутренняя теплота подобного газового шара, находящегося в таком равновесном состоянии, внезапно увеличивается, например, вследствие столкновения с другими массами; тогда в шаре должен начаться процесс расширения. Этот процесс должен будет постепенно замедляться, но в силу инерции объем все-таки зайдет за те пределы, при которых силы тяготения и расширения взаимно друг друга уравнивают. Когда процесс расширения окончательно прекратится, силы тяготения получат перевес и тогда в шаре начнется процесс сокращения. В течение последнего, вследствие выделения теплоты, расширительные силы снова начнут увеличиваться и постепенно прекратят процесс сокращения. Но и последнее наступит только тогда, когда шар в своем сжатии перейдет нижний объемный предел своего равновесия, следовательно, после этого шар снова должен будет начать расширяться. Таким образом, рассматриваемый газовый шар будет непрерывно испытывать колебания своего объема и температуры около некоторого положения равновесия, хотя извне на него не будет действовать никаких сил и, несмотря на то, что шар будет постоянно излучать теплоту. Такими периодическими изменениями температуры, вызываемыми изменениями объема, Риттер очень удачно объясняет существование *переменных звезд*. Больше того, по мнению Риттера, все *небесные тела*, за немногими исключениями, принадлежат к классу таких звезд, но только у большинства из них колебания температуры либо очень незначительны, либо протекают очень медленно. Исключение составляют, быть может, лишь некоторые *туманные пятна*, у которых первичная расширяющая сила теплоты настолько велика, что она уже не может быть

¹ „Wied. Ann.“, V, стр. 405; X, стр. 13; XI, стр. 978; XII, стр. 445; XIII, стр. 360; XIV, стр. 16; XVI, стр. 166; XVII, стр. 322; XVIII, стр. 488; XX, стр. 137 и 897; „Untersuchungen über die Höhe der Atmosphäre und die Constitution gasförmiger Weltkörper.“

324 СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

уравновешена тяготением, и вещество, постоянно расширяясь, все больше *рассеивается в пространстве*¹. Смелость, с которой Риттер применяет математический анализ к физическим проблемам мира, не могла не произвести импонирующего впечатления; правда, по поводу этих работ было не без основания указано, что подобное применение математического анализа *скорее интересно, чем надежно*. Предположение, что физические законы, например законы Мариотта и Гэ-Люссака, сохраняют свою силу при условиях температуры и давления, далеко выходящих за пределы наших наблюдений, во всяком случае, столь же ненадежно, как применение наших опытов к пространствам и временам, лежащим далеко за пределами наших представлений. *То же самое, в большей или меньшей степени, можно сказать и о приведенных выше гипотезах по вопросу о будущности вселенной. Но возможно, что эти работы представляют собой зачатки будущей физической науки, которая выйдет за пределы земли и действительно охватит всю вселенную.* Как раз описываемое ниже физическое открытие сделало превзошедший все ожидания важный шаг именно в этом направлении.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ, ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕЖДУ СВЕТОВЫМ ЭФИРОМ И ВЕСОВЫМИ МОЛЕКУЛАМИ (приблизительно от 1859 до 1880 г.).

Кинетическая теория газов, в связи с механической теорией теплоты, принесла поразительно богатые плоды и все более превращалась в механику молекул. Благодаря этому газообразное состояние материи легче всего поддавалось как физическому, так и математическому анализу. Это же свойство газообразное состояние одновременно проявило и в другой области и по той же самой причине, что и раньше, а именно — благодаря своей независимости от действия молекулярных сил. Выше было уже отмечено, что волновая теория света задерживалась в своем победоносном развитии всякий раз, когда ставился вопрос о *переходе движений с эфира на части весомой материи и обратно*. Поглощение света молекулами тел было всегда помехой для математической разработки этих вопросов, и физики оставались в полном неведении о зависимости излучаемого света от атомного и молекулярного строения тел. Эту-то загадку и разрешило, по крайней мере, частично, открытие спектрального анализа Кирхгофом и Бунзенем. Однако и здесь, как и в других случаях, законы явлений могли быть ясно и твердо установлены только для *газообразного состояния материи*.

Что касается истории открытия этого явления, то следует отметить, что и до Кирхгофа было сделано много наблюдений над призматиче-

¹ Риттер вычислил, что если бы солнце представляло собою адиабатический газовый шар, то каждый килограмм его массы содержал бы от 19 до 66 млн. *кал.* и годовому излучению соответствовало бы сокращение его диаметра на 72—114 *м.* Что касается *атмосферы луны*, то Риттер находит, что на изолированном и покоящемся в небесном пространстве теле, имеющем размеры и массу луны, атмосфера из водяного пара могла бы длительно существовать лишь при температуре минус 50° С на его поверхности. При движении же луны, если бы она даже состояла из ледяного шара с температурой на поверхности —60°, она должна была бы превратиться в кольцо пара, вращающееся вокруг земли.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ 325

скими и дифракционными спектрами. Эти многократные и усердные наблюдения имели своей целью преимущественно фактическую сторону дела; связи между световыми явлениями и структурой тел, излучающих свет, они касались лишь мимоходом, считая, что эта проблема представляет второстепенный интерес. *Напротив, Кирхгоф и Бунзен, не открывая никаких новых явлений (по крайней мере, вначале), выяснили связь между явлениями, установили закон, лежащий в основе всего разнообразия последних, и этим, обратно, столь благотворно повлияли на опытную физику, что новыми явлениями стали заниматься уже не только отдельные работники, и не одни только физики, но также и химики, и астрономы, обогащая науку поразительными результатами.* Указанное обстоятельство не только неопровержимо свидетельствует о том, что заслуга *действительного открытия и действительного завоевания* этой новой области науки принадлежит только Кирхгофу и Бунзену, но также еще раз показывает, что истинный прогресс науки достигается не простым описанием фактов и связанным с ним разобщением научных дисциплин, а установлением причинной связи между явлениями и объединением различных отраслей науки ¹.

Первое сообщение об открытии, сделанном им совместно с Бунзеном, Кирхгоф изложил в небольшой статье, содержащей всего две страницы в восьмую долю листа, помещенной в «*Monatsber. der Akad.*

¹ Что центр тяжести нового открытия заключался в выяснении связи между темными и светлыми линиями спектра, признал и У. Томсон в следующих словах, с которыми он обратился к Кирхгофу вслед за первым опубликованием открытия Кирхгофа и Бунзена: „Проф. Стокс сообщил мне лет десять тому назад в Кембридже, что проф. Миллер произвел опыт, доказывающий с высокой степенью точности совпадение двойной темной линии *D* солнечного спектра с двойною светлой линией спектра спиртового пламени, горящего с примесью поваренной соли (см. выше стр. 145). Я заметил, что должна существовать какая-то физическая связь между действиями, представляющими столь ясно выраженную общность. Он согласился с этим и указал, что, по его мнению, механическое объяснение этого факта может быть построено на следующих положениях; пары натрия должны обладать, по своему молекулярному строению, способностью колебаться в периоды, соответствующие степени преломляемости двойной линии *D*... С другой стороны, пары натрия в атмосфере, окружающей источник света, должны обладать большой способностью задерживать, т. е. поглощать, повышая свою температуру, свет из источника совершенно того же качества... Я не уверен, было ли это механическое объяснение опубликовано проф. Стоксом когда-нибудь в печати. В своих лекциях я в течение ряда лет постоянно приводил его, указывая вместе с тем, что химия солнца и звезд должна изучаться путем исследования тех земных веществ, которые в спектрах искусственного пламени дают светлые линии, соответствующие темным линиям спектров солнца и звезд" (Kirchhoff, „*Gesamm. Abhandl.*“, стр. 640, Leipzig 1882). Но если Тэт, приводя впоследствии это заявление Томсона („*Vorlesungen über einige neuere Fortschritte*“, Braunschweig 1877, стр. 159), заявляет: „Это было рождение спектрального анализа, поскольку речь идет о применении его к небесным телам“, то на это можно возразить, что подобное утверждение противоречит принятому в науке и совершенно справедливому обычаю приписывать открытие тому лицу, которое впервые довело его до известной степени зрелости и его опубликовало. А если, кроме того, верны и дальнейшие слова Тэта: „Ни Стокс, ни Томсон, по-видимому, в 1850 г. совершенно не подозревали, что они натолкнулись на нечто новое“, то выходило бы, что оба этих *гениальных* исследователя в 1850 г. еще не оценили значения, а следовательно, и сущности этого открытия.

der Wissenschaft. zu Berlin» за октябрь 1859 г. (стр. 662) под заглавием: «Über die Fraunhoferschen Linien» («О фраунгоферовых линиях») ¹. Так как это сообщение в сжатом виде уже содержит в себе все последующее, то мы приведем его дословно, сделавши только два пропуска: «Во время совместного с Бунзеном исследования спектров окрашенных пламен, давшего нам возможность узнавать качественный состав сложных смесей по внешнему виду их спектров в пламени паяльной трубки, я произвел несколько наблюдений, которые приводят к неожиданному заключению о происхождении фраунгоферовых линий и дают возможность судить о материальном составе атмосферы солнца, а может быть, и наиболее светлых неподвижных звезд. Фраунгофер заметил, что в спектре пламени свечи имеются две светлые линии, совпадающие с двумя темными линиями *D* солнечного спектра. Эти же светлые линии можно получить в более ярком виде, если в пламя ввести поваренную соль. Я получил солнечный спектр, но при этом солнечные лучи, раньше, чем они попадали в щель, я пропустил через сильное пламя с поваренной солью. Когда солнечный свет был достаточно ослаблен, то на месте двух темных линий *D* появлялись две светлые; но когда интенсивность солнечного света переходила известную границу, темные линии *D* выступали в спектре гораздо отчетливее, чем при отсутствии пламени поваренной соли». Описав затем два подобных же опыта, Кирхгоф продолжает:

«Из этих наблюдений я заключаю, что *цветные пламена, в спектрах которых встречаются светлые резкие линии известного цвета, до такой степени ослабляют проходящие через них лучи того же цвета, что на месте светлых линий выступают темные, как только позади пламени ставят достаточно сильный источник света, в спектре которого эти линии отсутствуют.* Далее, я заключаю, что темные линии солнечного спектра, которые вызываются не земной атмосферой, возникают вследствие присутствия в раскаленной атмосфере солнца таких веществ, которые в спектре пламени дают на том же месте светлые линии. Можно считать, что светлые линии в спектре пламени, совпадающие с линиями *D*, всегда происходят вследствие присутствия в нем натрия; поэтому темные линии *D* в солнечном спектре заставляют думать, что в атмосфере солнца имеется натрий» ... «Ввиду этого исследование спектров цветных пламен приобретает новый большой интерес; мы с Бунзеном будем его продолжать, насколько это нам позволят наши средства. При этом мы подробнее исследуем наблюденное мною ослабление лучей света при прохождении их через пламя. При опытах, произведенных нами в этом направлении, уже выявился один факт, который нам представляется

¹ Также в его „Gesamm. Abhandl.“ стр. 564) и в „Pogg. Ann.“, СІХ стр. 148. Этому исследованию в области оптики предшествовала лишь одна работа Кирхгофа „Über den Winkel der optischen Achsen des Aragonits für die verschiedenen Fraunhofer'schen Linien“ („Pogg. Ann.“, СVІІІ. стр. 567). В ней нет еще и намека на мысль о спектральном анализе, но зато имеется описание прибора для определения осевых углов для различных фраунгоферовых линий, который, можно думать, привел к идее устройства прибора для спектрального анализа.

ИЗЛУЧЕНИЕ И ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА И ТЕПЛОТЫ 327

очень важным. Для того чтобы в друммондовом свете линии D оказались темными, требуется пламя поваренной соли более низкой температуры. Для этой цели годится пламя водного алкоголя, пламя же бунзеновской горелки для этого непригодно. В пламени последней малейшее количество поваренной соли, едва заметное на глаз, уже дает светлые линии натрия. Мы оставляем за собой исследование и изложение выводов, которые могут быть сделаны из этого явления».

Ближайшие затем работы Кирхгофа пошли именно в этом направлении. Уже в декабре 1859 г. он опубликовал новую небольшую статью «Über den Zusammenhang zwischen Emission und Absorption von Licht und Wärme» («О связи между излучением и поглощением света и теплоты») ¹, в которой он установил общее положение, «что для лучей одной и той же длины волны, при одной и той же температуре, отношение лучеиспускательной способности к поглощательной для всех тел одинаково». Для доказательства этого положения он допускает, что возможно, по крайней мере, одно тело, которое испускает только лучи какой-нибудь *одной* определенной длины волны и которое *поглощает* лучи только той же самой длины волны, и что возможны такие *зеркала*, которые полностью отражают все падающие на них лучи.

Если, далее, представить себе пластинку из вещества, обладающего указанным выше свойством, поставленную против другой пластинки, которая излучает и поглощает всевозможные лучи, и если представить себе, что задние поверхности этих пластинок являются идеальными зеркалами, то из равенства излучения и поглощения, при установившемся равновесии температуры для обеих пластинок, можно легко вывести постоянство отношения между лучеиспускательной и поглощательной способностью при одной и той же температуре у указанных двух пластинок, а также у всех тел вообще. В более подробной работе 1861 г. Кирхгоф обосновал это положение более детально и строго, не прибегая к упомянутому выше допущению о возможности тела, которое излучало бы и поглощало только один вид лучей ².

Это положение, которое дало возможность применить спектральный анализ к изучению химического состава солнца и звезд, представлялось Кирхгофу и Бунзену, особенно важным и выдвигалось ими на первый план. Другое же положение, на котором, в сущности, и основывалось применение данного открытия для анализа, а именно, *положение об исключительной зависимости спектров от излучающих свет элементов* ими вначале меньше подчеркивалось, они его рассматривали скорее как нечто совершенно очевидное. Однако уже в апреле 1860 г. они дали также экспериментальное обоснование этого положения в совместной своей работе: «Chemische Analyse durch Spectralbetrachtungen» («Химический анализ с помощью спектральных наблюде-

¹ „Monatsber. d. Berl. Akad.“, стр. 783, декабрь 1859: „Gesamm. Abh.“, стр. 560.

² „Untersuchungen über das Sonnenspectrum und die Spectren der chemischen Elemente“, „Abhandl. d. Berl. Akad.“, 1861; см. статью: „Über das Verhältniss zwischen dem Emissionsvermögen und dem Absorptionsvermögen der Körper für Wärme und Licht“ в „Gesammelte Abhandlungen“, стр. 571.

328 ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ТЕЛ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ЛИНИИ

ний»)¹. Они исследовали спектры водных окисей, бромистых и йодистых соединений, серно - и углекислых солей калия, натрия, лития, бария, стронция и кальция в пламени серы (1820° С), сернистого углерода (2195° С), светильного газа (2350° С), окиси углерода (3042° С), водорода (3259° С) или гремучего газа (3061° С) и в результате этих обширных и продолжительных наблюдений пришли к надежному выводу, «что ни различие форм соединений, в которых применены металлы, ни разнообразие химических процессов в отдельных пламенах, ни громадное различие температур этих пламен *нисколько не влияют на положение спектральных линий, соответствующих отдельным металлам*». К такому же выводу привели их и наблюдения явлений в гейсслеровских трубках при пропускании искр через электроды из калия, натрия, лития, стронция и кальция. Сравнивая их спектры со спектрами поставленных позади них пламен соответствующих металлов, они убедились, что даже в блестящих спектрах электрических искр нет никакого смещения линий, наблюдаемых ими в пламенах; если же при этом и получались какие-либо посторонние линии, то они должны были происходить от примеси посторонних металлов и от азота, находившегося в гейсслеровских трубках. Поэтому авторы с полным основанием сочли научно твердо установленным, *что светлые линии в спектре можно считать надежным признаком присутствия соответствующих металлов*, и затем перешли к описанию отдельных спектров, а также к более детальному выяснению преимуществ этого нового химико-аналитического метода. Возможность *космического применения* открытого ими анализа была здесь выражена еще более ясно, чем раньше, так как помимо прежнего обращения линии натрия им легко удалось показать также обращение светлых линий калия, стронция, кальция и бария.

Лучшим доказательством оригинальности и важности открытия Кирхгофа и Бунзена явилась поразительно *быстрая* и *огромная* его *плодотворность*. Уже в упомянутой только что работе 1860 г. они сообщили, что при помощи нового метода им удалось бесспорно доказать *существование* в щелочной группе калия, натрия и лития еще *четвертого металла*. Вслед за тем этот новый металл, под названием *цезия*, был подробно описан Бунзеном. В следующем году Бунзен нашел *пятый металл той же группы, рубидий*, а год спустя У. Крукс² открыл в сернистом осадке, на фабрике серной кислоты в Тилькенроде, новый элемент *таллий*, в котором Лами³ признал новый тяжелый металл. Наконец, в 1862 г. Рейх и Рихтер⁴ нашли новый металл, *индий*, близкий к *алюминию*, а позднее, при помощи того же спектрального способа, был найден ряд новых элементов.

После этого Кирхгоф и Бунзен занялись *усовершенствованием своих приборов* и применением их к *изучению космических явлений*.

¹ „Pogg. Ann.", CX, стр. 161; „Gesamm. Abhandl.", стр. 598. К статье были приложены изображения спектрального прибора (еще без масштаба), равно как спектров солнечного света и металлов калия, натрия, лития, стронция, кальция, и бария.

² „Philosophical Magazine" (4) XXI, стр. 301, 1861.

³ „Comptes rendus", LIV, стр. 1255, 1862.

⁴ „Erdman's Journ. f. pract. Chem.", LXXXIX, стр. 441; XC, стр. 172.

ОПТИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС 329

В 1861 г.¹ они прибавили к своему спектро스코пу *третью трубку со шкалой* в конце ее — для более точного определения положений линий, и описали устройство *отражательной призмы*, с помощью которой под спектром исследуемого вещества может быть для сравнения получен спектр нормального источника света. По поводу того обстоятельства, что различные химические соединения одного и того же металла всегда дают одни и те же линии, они высказали два очень важных предположения: *либо линии совершенно не зависят от элементов, химически связанных с металлами, либо эти соединения при высокой температуре распадаются* и тогда спектры металлов берут перевес. Кирхгоф и Бунзен склонялись больше в сторону *последнего* предположения, которое, между прочим, подкреплялось тем фактом, что линии поглощения, которые были видны в парах йода, в парах йодистого калия отсутствовали. Для получения спектра возможно большей длины Кирхгоф устроил спектроскоп из *четырёх флинтгласовых призм*² и применил его, прежде всего для *детального изучения солнечного спектра*. Этим путем он установил, что в *атмосфере солнца* в большом количестве содержатся только *железо, кальций, магний, натрий и хром*, в меньшем — *золото, серебро, ртуть, алюминий и кадмий*; по-видимому, совершенно отсутствуют свинец, мышьяк, сурьма, стронций, литий и кремний. На основании этих данных Кирхгоф пришел к заключению, что солнце состоит из *раскаленной жидкой массы*, окруженной *атмосферой паров*. *Солнечные пятна* представляют собой *облака или шлаки*, большая изменчивость которых объясняется *течениями в солнечной атмосфере*³. Вслед за опубликованием первой статьи Бунзена и Кирхгофа работы по спектральному анализу стали появляться в таком множестве, что уже за годы 1860 и 1861 одни лишь работы известных физиков можно насчитать десятками. При этом в круг исследований был введен новый элемент, которого Кирхгоф и Бунзен почти не коснулись, — *аналогия с акустическими явлениями*. Уже в 1860 г.⁴ Стокс назвал закон Кирхгофа *оптическим резонансом*, а в 1862 г. Ангстрем⁵ с большой настойчивостью заявил, что уже в 1853 г. он высказал мысль, что в силу резонанса частицы тел поглощают преимущественно те волнообразные колебания эфира, которые в них самих легче всего возникают под действием молекулярных сил. Но применение акустических аналогий нашло себе место не только при объяснении обращения светлых

¹ „Pogg. Ann.“, CXIII, стр. 337, 1861.

² Кук („Chemical News“, 1863 г.) снабдил свой спектральный аппарат девятью призмами с сероуглеродом и таким путем нашел, что в солнечном спектре имеется бесчисленное множество линий, „как звезд на небе“.

³ Этой работой „Untersuchung über das Sonnenspectrum und die Spectren d. chem. Elemente“ („Berl. Abhandl.“ 1861; также отдельное издание F. Dümmler'a, Berlin 1862) заканчивается ряд основных работ Кирхгофа по спектральному анализу. Дальнейшие работы в „Abhandl. d. Berl. Akad.“ 1862 г. посвящены, главным образом, опытам, имеющим целью подтверждение изложенных раньше теоретических положений.

⁴ „Phil. Mag.“ (4). XIX, стр. 193, 1860.

⁵ „Pogg. Ann.“, CXVII, стр. 290. Выше мы уже показали, что тогдашний взгляд Ангстрема на оптический резонанс был еще далеко не правилен. — Anders Jans Angström (1814—1874) — профессор физики в Упсале.

330 СПЕКТРЫ РАЗЛИЧНЫХ ПОРЯДКОВ

спектральных линий, но и при объяснении возникновения этих линий в результате *внутренних движений* светящихся тел. Хотя благодаря этому спектральный анализ получил, с одной стороны, новое наглядное обоснование, но с другой, — благодаря тому, что законы его были сведены к движениям мельчайших частиц тела, — он был вовлечен во все трудности молекулярной теории и вместе с последней попал в область неразгаданного.

Если какому-либо телу, например натянутой струне, металлическому язычку или же столбу воздуха в духовом инструменте сообщить звуковые колебания, то скорость последних, а, следовательно, и высота тона не зависят от силы толчка, а зависят только от размеров, тяжести и т. д. самого звучащего тела. Точно так же и скорость тех световых колебаний, которые могут быть у данного вещества, а, следовательно, и цвет испускаемого им света зависят только от величины и напряжения его молекул или атомов. Но так как атомы всех химических элементов имеют различный вес, то каждый элемент в раскаленном состоянии должен испускать особый вид световых колебаний, т. е. одноцветный однородный свет, который в спектре дает определенную линию. Однако эти колебания, соответствующие тяжести и пр. могут возникнуть в атомах лишь в том случае, когда они совершенно свободны, т. е. когда они не находятся в соединении с другими атомами, или, другими словами, когда они находятся в газообразном состоянии. *Следовательно, только раскаленные газы могут давать однородный свет, или спектр, состоящий из отдельных линий, линейный спектр.* Что касается жидкостей и твердых тел, где атомы различным образом связаны друг с другом силами сцепления, то здесь свойственные атомам колебания под влиянием этих связей замедляются или же ускоряются, и тогда вместо одного вида колебаний получаются всевозможные цветные тона. *Следовательно, для спектрального анализа тела следует применять только в газообразном состоянии.* Но к этому присоединяется еще ряд других моментов. Легко понять, что *атомам химических элементов* должны быть присущи иные цветные тона, чем *более тяжелым молекулам их соединений*. Хотя при высокой температуре пламени большинство химических соединений и разлагается на элементы, так что обыкновенно в спектрах получаются линии, характерные для элементов, но есть и такие огнеустойчивые соединения, которые противостоят действию обычных пламен, и тогда получают спектры соединений, а не элементов. Все такие соединения требуют предварительного изучения их спектров, и только после этого станет возможным правильное применение спектрального анализа ¹. Далее, яркость свечения различных тел в раскаленном состоянии неодинакова. Металлы стоят в этом отношении в большинстве случаев на первом

¹ Так как в звездах, при наличии там высоких температур, можно допустить, как правило, разложение всех соединений, то *космическое применение спектрального анализа можно считать независимым от исследования весьма многочисленных, быть может, спектров соединений* и здесь можно скорее ожидать правильных выводов, чем при исследовании земных тел, как это и оправдалось на деле. Но зато при анализе состава небесных тел должно сказаться в сильной степени влияние на характер спектра температуры и давления.

СПЕКТРЫ РАЗЛИЧНЫХ ПОРЯДКОВ 331

месте, металлоиды отступают на второй план, но особенно слабый свет излучают даже в раскаленном состоянии газообразные элементы, как это уже видно из обращения светлых линий тел в газовых атмосферах. Спектры газов можно наблюдать почти исключительно в *гейслеровских трубках*, пропуская через них электрические искры. Но при этом, конечно, *давление и температура* опять-таки оказывают значительное влияние на спектры. Сильное давление, сближая молекулы, ограничивает свободу их колебаний и, присоединяя к световым тонам, обычно свойственным молекулам, в первую очередь ближайшие тона, расширяет линии спектра в более или менее обширные полосы; в результате этого *линейный спектр превращается в полосатый*. Аналогичным образом действуют и *температурные изменения*. Но как далеко могут при этом зайти изменения спектров, влияет ли температура только на ширину линий или же она изменяет весь вид спектра, — эти вопросы оказались очень трудными для разрешения.

Уже в начале 1859 г. Плюкер¹ описал спектры разреженных газов в гейслеровских трубках, а в 1862 г.² он отметил, что *от одного и того же вещества* можно получить спектры различного вида и что поэтому, раньше, чем ставить вопрос о надежности спектрального анализа, следует установить зависимость спектров от температуры. Затем на основании более обширной работы, произведенной совместно с Гитторфом, он же указал³, что для *водорода, азота, паров серы* и некоторых других газов можно по желанию получить два вида спектров: один слабый, *сплошной, с затененными участками*, другой — состоящий из ряда *светлых линий* с темными промежутками. *Первый вид* спектров, получающийся в гейслеровских трубках при *слабом давлении* от тока небольшой катушки Румкорфа, Плюкер назвал *спектрами первого порядка*; *второй вид*, легко получающийся при включении лейденской банки в цепь тока, он назвал *спектрами второго порядка*. Так как включение лейденской банки дает лишь кратковременное прохождение через трубку значительных зарядов электричества, следовало полагать, что причиной превращения спектров первого порядка в спектры второго является возникающая при этом *высокая температура*.

За Плюкером последовал Вюльнер. В 1866 г. он случайно заметил, что для водорода, кроме линейного и полосатого спектров (этими терминами он удачно заменил спектры 1-го и 2-го порядка Плюкера) существует еще *третий вид* спектра. Затем в более обстоятельной работе 1868 г.⁴ он подробно сообщил об изменении спектров водорода, *кислорода* и *азота* в гейслеровских трубках с *изменением давления*. Оказалось, что давление вызывает такие же изменения, как включение в цепь лейденской банки. Так, постепенно выкачивая газ

¹ „Pogg. Ann.“, CVII, стр. 497 и 638.

² „Cosmos“, XXI, стр. 283 и 312, 1862. Обзор в „Die Fortschritte der Physik im Jahre 1862“.

³ „Phil. Trans.“, стр. 1, 1865. — W. Hittorf (родился в 1824) — профессор физики в Мюнстере.

⁴ „Pogg. Ann.“. CXXXV, стр. 497; CXXXVII, стр. 337.— Ad. Wüllner — профессор физики в Аахенской политехнической школе.

332 ИССЛЕДОВАНИЯ ВЮЛЛЬНЕРА, АНГСТРЕМА И ЦЕЛЛЬНЕРА

при помощи шпренгелевского насоса из гейсслеровской трубки ¹, наполненной водородом и снабженной двумя платиновыми электродами, впаянными на расстоянии 1,4 дюйм. друг от друга, — он наблюдал, что ток начинал проходить при 135 мм давления; при 70 мм был уже ясно виден *сплошной спектр*; при 30 мм он был виден наиболее ясно, затем он начинал ослабевать, причем одновременно выступали *три светлые линии линейного спектра*; между 3—2 мм давления сплошной спектр совершенно исчезал, указанные же линии сохраняли свою яркость. При дальнейшем понижении давления и они тускнели; под конец же вновь становилась видной *часть сплошного спектра*, а именно, зеленая его часть. Однако эти изменения Вюльнер не приписал непосредственно давлению, он объяснил их связанным с давлением изменением электрического сопротивления и *изменением температуры* электрического разряда. По его словам ² «эти наблюдения показывают, что описанный (сплошной) спектр водорода действительно соответствует более низкой температуре, чем спектр, состоящий из трех светлых линий, так как с увеличением плотности газа в спектральной трубке температура в ней должна понизиться, ибо сопротивление индукционному току с увеличением плотности газа возрастает, и масса нагреваемого газа увеличивается. Но подобно тому как большая плотность газа мешает полному проявлению действия тока, так и очень сильное разрежение газа ослабляет его, ибо при достаточно большом разрежении ток в спектральной трубке может совершенно прекратиться. Следовательно, тот факт, что сплошной спектр появляется как при относительно высоких давлениях, так и при очень больших разрежениях, доказывает, что этот спектр требует сравнительно низких температур».

Утверждение о существовании различных по виду спектров у одного и того же элемента вызвало много возражений. Особенно резко выступил против Вюльнера Ангстрем. Уже в своих «Исследованиях над солнечным спектром» 1868 г. ³ он высказался против возможности существования различных видов спектров. Он допускал, что спектры могут видоизменяться, что с повышением температуры могут выступить новые линии и может измениться их яркость, что при прерывистых разрядах и с повышением напряжения в гейсслеровских трубках линии могут расширяться в полосы и линейные спектры могут перейти в сплошные, но он утверждал, что, *тем не менее, из спектра одного вида никогда не может получиться спектр совершенно иного характера*. Три года спустя ⁴ он объяснил причину появления различных видов спектров, главным образом, ненадежностью условий наблюдения, когда разрежение газа доводится до крайних пределов. Так, при сильнейшем разрежении атмосферного воздуха в гейсслеровской

¹ При всех этих опытах трубки были посредине вытянуты в капилляры.

² „Pogg. Ann.“, CXXXV, стр. 506.

³ „Recherches sur le Spectre Solaire“, Upsala 1868 (и Берлин 1869). К этой работе приложено изображение солнечного спектра длиной в 3,387 м, в котором впервые линии определены по длине своей волны. Это изображение было изготовлено при содействии Р. Талена.

⁴ „Comptes rendus“, LXXIII, стр. 369, 1871; „Pogg. Ann.“, CXLIV, стр. 300.

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЮЛЬНЕРА, АНГСТРЕМА И ЦЕЛЛЬНЕРА 333

трубке получились один за другим сначала *обыкновенный спектр воздуха*, затем *полосатый спектр азота*, далее *спектр окиси углерода* и, наконец, даже линии *натрия* и *хлора*. На этом основании он полагал, что в опытах Вюльнера с кислородом, азотом и водородом полученные им результаты имели своим источником *загрязнение* этих газов и пытался показать, что наблюдаемые Вюльнером случаи отступления спектров от линейной формы произошли вследствие примеси *угля, серы* и их соединений. Это побудило Вюльнера продолжить свои исследования, прежде всего именно в этом направлении ¹. И действительно, он нашел, что два из описанных им спектров кислорода, по всей вероятности, обязаны своим происхождением соединениям углерода из жира, примененного им для смазки кранов насоса. Но относительно спектров водорода и азота поводов для подобных сомнений не оказалось. Так как при давлении в 500 мм оба спектра азота зачастую появлялись одновременно или один вслед за другим, то Вюльнер попытался точнее определить ², какое влияние оказывают на спектр *различные виды* электрических разрядов. Для этих опытов он применил трубки без капиллярного сужения посередине, а разряды наблюдал при помощи *вращающегося зеркала*; при этом оказалось, что пока разряд остается непрерывным, всегда получаются полосатые спектры, при первой же проскакивающей искре тотчас же появляются и светлые линии ³; таким образом, связь полосатых спектров с непрерывным разрядом и линейных спектров с искровым разрядом оказалась несомненной. Для объяснения этих явлений Вюльнер воспользовался работой Целльнера о влиянии температуры и плотности на спектры нагретых газов. А именно, Целльнер сделал из закона Кирхгофа об отношении между излучением и поглощением общий вывод ⁴, что отношение яркости двух соседних частей спектра зависит от температуры, плотности, коэффициента поглощения, а также *от толщины светящихся слоев*, причем, *чем последние толще*, тем большую тенденцию проявляет спектр к тому, чтобы стать сплошным ⁵. Вот это-то влияние толщины излучающего слоя и обуславливает по Вюльнеру появление различных спектров в гейсслеровских трубках ⁶. При безыскровом разряде, распространяющемся в большей или меньшей степени по всей массе газа, свет испускается всегда сравнительно толстым слоем вещества, поэтому в спектре должны встречаться волны всяких длин, которые газ способен излучать при данной темпера-

¹ „Pogg. Ann.“, CXLIV, стр. 481, 1871.

² „Pogg. Ann.“, CXLVII, стр. 321, 1872.

³ Кундт („Pogg. Ann.“, CXXXV, стр. 315, 1868) наблюдал во время молнии как линейные, так и полосатые спектры; первые выступали особенно ясно при зигзагообразных молниях, но иногда обе эти формы быстро следовали друг за другом при одной и той молнии.

⁴ „Pogg. Ann.“, CXLII, стр. 38, 1871.

⁵ Путем повышения давления можно уничтожить различие интенсивности света в соседних частях спектра; наоборот, изменить это отношение *на противоположное* так, чтобы на месте прежнего минимума появился максимум и обратно, можно только путем изменения температуры („Pogg. Ann.“, CXLII, стр. 102).

⁶ „Pogg. Ann.“, CXLIX, стр. 103, 1873.

334 СПЕКТРЫ ПОГЛОЩЕНИЯ

туре. Но при относительно слабой интенсивности должны выявляться малейшие различия спектра испускания волн различной длины. При искровых же разрядах всегда светится лишь небольшое число частиц (т. е. очень тонкий слой газа), а именно только те молекулы, на которые непосредственно попадает искровой разряд; поэтому в спектре могут появиться лишь отдельные светлые линии; и лишь тогда, когда температура искры становится чрезвычайно высокой, она может дать и сплошной спектр. Против этого объяснения Ангстрем опять высказался в большой посмертной работе 1875 г., изданной его сотрудником Таленом ¹. В этой работе Ангстрем твердо стоит на той точке зрения, что простое вещество (пока его природа не изменяется) может иметь лишь один спектр и что раскаленный газ может иметь только линейный спектр. Что же касается разнородных спектров, наблюдавшихся на водороде и на других элементарных газах, то все они, за исключением одного для каждого тела, являются *спектрами соединений* или, по крайней мере, *спектрами более сложных молекулярных модификаций*. Он не отрицает возможности различных спектров и для простого вещества, но только в том случае, когда оно существует в различных *аллотропических модификациях*. *Каждая из этих модификаций должна, во всяком случае, иметь свой особый спектр поглощения*; проявляются ли эти различия и в *спектрах пламени*, зависит от того, сколько из этих модификаций выдерживают температуру накаливания без разложения. Так, кислород должен иметь *два различных спектра поглощения*, один — принадлежащий *обыкновенному кислороду*, другой — *озону*; но так как озон при высоких температурах разлагается, то раскаленный кислород имеет лишь один спектр. Что касается различия спектров при различных видах электрических разрядов, то искровой разряд распыляет тела на мельчайшие частицы и разлагает их химически; поэтому при искровом разряде всегда появляется *спектр элемента*, между тем как при постоянном разряде появляются и *спектры соединений*.

Несмотря на то, что оппоненты продолжали твердо настаивать на правильности своих мнений, выяснение данного спорного вопроса все-таки значительно подвинулось вперед и фактически произошло известное сближение противоположных точек зрения. Было признано, что и у элементов возможно изменение спектров и что причины этого изменения следует искать в изменениях температуры, давления, коэффициентов поглощения и молекулярного строения. Расхождение во взглядах оставалось лишь по вопросу об относительном значении каждой из этих причин, но по этому вопросу, по-видимому, и нельзя было ожидать скорого решения. Первой и, пожалуй, наиболее важной из очередных проблем представлялся вопрос о *зависимости спектров от молекулярного строения лучеиспускающих и поглощающих веществ*. Если вид спектра связан со строением молекулы таким образом, что уже аллотропическая модификация вещества вызывает изменение спектра, то можно ожидать, что при наивысшей диссоциации веществ

¹ „Nova Acta Soc. Upsal." (3), IX, 1875. Обзор в „Beiblätter zu Pogg. Ann.", I. стр. 36, 1877.

ЛОКАЙЕР. СПЕКТРЫ ХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ 335

(под действием высоких температур или больших электрических сил) наряду с *молекулярными спектрами* или после них появятся и *атомные спектры*. Больше того, — если простота спектра зависит от простоты строения молекулы, то можно думать, что *сложный состав спектров, содержащих большое количество линий, указывает на то, что наши так называемые элементы состоят из еще более простых веществ, из которых каждое имеет абсолютно простой спектр, содержащий только одну линию*. Первым пришел к этой мысли и разработал ее Локайер. Еще в 1873 г.¹, сравнивая между собою спектры химических соединений и искусственных смесей, он пришел к выводу, что *каждое сложное тело совершенно так же, как и каждое простое, имеет свой собственный спектр*; что эти спектры состоят преимущественно из полос и что эти полосатые спектры, при более сложном составе соединений, приближаются к сплошным спектрам, а при более простом составе — к линейным. В следующей работе 1874 г.² он занялся подробнее связью между строением тел и спектроскопическими явлениями. Здесь он указал, что линейные спектры появляются лишь в тех случаях, когда согласно новейшей теории газов молекулы находятся в состоянии свободного движения, между тем как в остальных случаях получаются сплошные спектры. Если, по его словам, взять, например, водород и посмотреть его спектр после того, как ртутный насос проработал в течение целых суток, то этот спектр окажется состоящим из одной единственной линии. Но если трубку снова заполнить газом при атмосферном давлении и затем увеличить давление вдвое и продолжать его увеличивать дальше, то наблюдавшаяся вначале зеленая линия начнет утолщаться, наряду с ней появятся новые линии, которые тоже будут утолщаться, и, наконец, когда давление достигнет 20 ат, спектр водорода станет сплошным и не будет ничем отличаться от спектра твердого тела. В легких металлах приближение линейного спектра к сплошному происходит, по-видимому, преимущественно путем расширения линий, а в тяжелых металлах путем увеличения их числа. В заключение Локайер приходит к выводу, что *линейные спектры обязаны своим происхождением свободным атомам, а полосатые — молекулам или скоплениям молекул*.

Мнение Локайера о существовании собственных спектров химических соединений встретило большое сочувствие. В 1877 г. Дж. Мозер вернулся к идеям Ангстрема и Талена, что согласно закону поглощения Кирхгофа спектральные особенности тел можно наблюдать как при помощи спектров пламени, так и при помощи *спектров поглощения* и что последнего рода наблюдения особенно пригодны для

¹ „Proc. of the Roy. Soc.“, XXI, стр. 83, 285 и 508. 1873: „Researches in spectrum analysis in connexion with the spectrum of the sun“. Приведенные здесь положения изложены прежде всего во второй из указанных выше статей. Тут же Локайер высказывает мысль, что линии, совпадающие в спектрах различных металлов, не могут быть одинаковым образом представлены в различных спектрах; указанное совпадение линий он объясняет здесь загрязнением одного металла другим. — Joseph Norman Lockyer (род. в 1836 г.) — издатель журнала „Nature“ в Лондоне.

² „Nature“, X, стр. 69 и 89, 1874; „Atoms and Molecules spectroscopically considered“; там же, стр. 154; „On the evidence of variation in molecular structure“.

336 РАЗЛОЖЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ

изучения спектров аллотропических модификаций, так как они могут производиться при *обыкновенных температурах*¹. Исследовав большое количество таких спектров поглощения, Мозер, подобно Локайеру, пришел к выводу, что каждое химическое соединение имеет свой особый спектр; что существенные изменения в спектрах могут быть вызваны только изменениями в химическом составе тел, а изменения массы и температуры светящегося источника могут дать лишь незначительные изменения спектров. По вопросу о линейных и полосатых спектрах и их связи со спектрами атомов и молекул он тоже присоединился к Локайеру. К аналогичным результатам пришел около этого времени и Циамициан², пытавшийся, кроме того, установить связь между спектрами химически родственных элементов. Сопоставление спектров тридцати одного различных элементов привело его к следующим выводам. Спектральные линии родственных элементов соответствуют друг другу каждая в отдельности или группами, так что всякая естественная группа элементов имеет свой особый спектр, который у отдельных членов отличается лишь тем, что однородные линии в нем смещены к тому или другому концу спектра. Увеличение и уменьшение длины волны однородных линий в химически родственных элементах находится в связи с интенсивностью их химических сил; большей величине химической живой силы соответствует и большая длина волны³. Что Ангстрем отнесся очень благоприятно к взглядам Локайера⁴, было так же естественно, как и прямо противоположное отношение к ним со стороны Вюльнера. Последний в своей работе 1879 г.⁵ установил, что при достаточной тонкости слоев и достаточно низком давлении полосатый спектр азота может быть путем повышения температуры постепенно переведен в линейный спектр, и что при этом можно ясно видеть полное обращение соотношения яркостей. Отсюда он снова пришел к выводу, *что характер спектра зависит только от температуры, плотности и толщины лучеиспускающего слоя газа и что, следовательно, для объяснения различных видов спектра не требуется никаких новых гипотез, вроде диссоциации молекул и т. п.* Между тем Локайер в целом ряде работ продолжал смело развивать свою теорию именно в этом направлении. Уже раньше он в соответствии со своей теорией наблюдал, что различные соединения кальция имеют свои особые спектры и что с повышением температуры все эти спектры все больше приближаются к общему для них всех

¹ „Pogg. Ann.", CLX, стр. 177, 1877. — James Moser (родился в 1852 г.)— доцент физики Венскою университета.

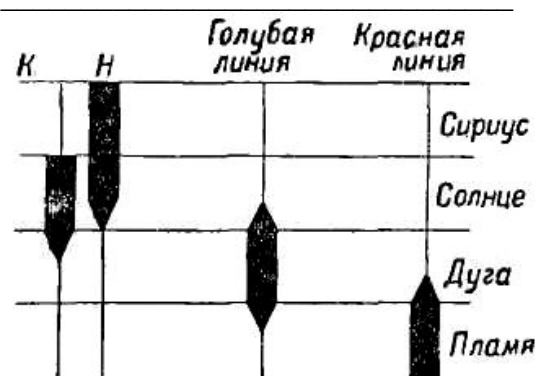
² „Anzeiger der K. Akad. d. Wissensch. in Wien, math. naturw. Classe", XIV, стр. 181, 1877.

³ Подобные же идеи развивал Лекко де-Буабодран, начиная уже с 1865 г. По его мнению, различные виды спектра одного и того же элемента вызываются различными движениями молекул, как-то: вращением, колебанием и поступательным движением. Смещение же однородных линий в родственных элементах зависит не от интенсивности химических сил, а от большей или меньшей тяжести молекул („Comptes rendus", LXIX, стр. 445, 606, 657, 694, 1869)

⁴ См. также „Pogg. Ann.", юбилейный том, стр. 429, 1874. ⁵ „Wied. Ann.", VIII, стр. 590, 1879.

РАЗЛОЖЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ 337

линейному спектру металла кальция. Теперь же он заметил, что с дальнейшим повышением температуры и этот линейный спектр может еще претерпеть изменения. При температуре электрической дуги линия кальция в голубой части спектра очень интенсивна, а фиолетовые линии *H* и *K* еще тонки; в спектре же солнца голубая линия очень слаба, а линии *H* и *K* очень широки. Установив подобные же явления на других металлах, Локайер пришел к мысли, что эти изменения линейных спектров происходят, быть может, от тех химических разложений, которые наши элементы могут претерпеть при высоких температурах, господствующих на небесных светилах. Другими словами, в светилах могут содержаться не наши элементы как таковые, а только основные вещества, из которых эти элементы составлены, причем эти вещества находятся в свободном состоянии; при этом возможно, что в различных светилах встречаются не все составные вещества того или другого из наших элементов, а лишь некоторые из них. В соответствии с этим он по спектрам звезд, снятым Геггинсом, установил, что линии кальция *H* и *K* в спектрах различных звезд представлены неодинаково; что в спектре Сириуса и звезды α в созвездии Лиры видна одна или почти лишь одна линия *H*¹. По вопросу о том, каким образом элементы составлены из основных веществ, Локайер, далее, приводит следующие соображения. Уже Тален раньше заметил, что в спектрах различных металлов некоторые линии или группы линий полностью или, во всяком случае, приблизительно совпадают. Локайер сначала думал, что подобная группа свойственна только одному металлу, а в спектре другого она может появиться лишь в результате его загрязнения. Теперь же он пришел к выводу, что такие линии могут быть действительно в спектрах многих металлов и что эти совпадения указывают на общность соответствующих составных частей элементов. Для того чтобы установить точнее эти общие, так называемые «основные линии», он сравнил сильно увеличенные части спектров металлов с соответствующими частями солнечного спектра², а так как линии железа в вольтовой дуге имели особенно большое



Черт. 12.

¹ Все эти выводы, плод своих многолетних работ, Локайер потом собрал в одной работе: „Discussion of the working hypothesis that the so-called elements are compound bodies“, которая появилась в „Proc. of the Roy. Soc.“, XXVII, стр. 157, 1878; также в „Nature“, XIX, стр. 197 и 225, а в переводе на немецкий язык в „Beiblätter zu Wied. Ann.“, III, стр. 88. Приложенный рисунок поясняет вид линий кальция в различных спектрах („Proc. of the Roy. Soc.“, XXVIII, стр. 171).

² Увеличение спектров было так сильно, что весь спектр, если бы он был составлен в масштабе увеличенной его части, имел бы длину $\frac{1}{16}$ английской мили. Для большей точности наблюдений Локайер всегда пользовался фотографическими снимками спектров.

338 СМЕЩЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

сходство с такими же линиями солнца, то он остановился, прежде всего, на линиях железа. Необходимые для установления различных диссоциаций различия температур он думал найти в *солнечных пятнах* и *протуберанцах*; и действительно, при многочисленных своих наблюдениях он заметил большое различие линий. К сожалению, это различие было очень непостоянным, и некоторые определенные основные линии можно было наблюдать лишь благодаря тому, что одна часть линий солнечных пятен, несмотря на малую порой интенсивность, всегда представлялась в расширенном виде; эта часть составляла не более $\frac{1}{10}$ доли всех линий, которые бывают видимы в парах железа. Но, с другой стороны, — *диссоциация земных элементов*, в частности — железа, была подтверждена как раз этими различиями линий в различных частях солнца. В самом деле, Локайер не только заметил, что отдельные линии железа в одних пятнах были представлены, а в других отсутствовали, но он также установил, что *различные линии* в одном и том же пятне дают различное смещение в спектре, тем самым указывая на совершенно различные *движения светящихся масс*, причем эти движения *не только отличались* между собою *своими скоростями*, но иногда имели *прямо противоположное направление*. На этом основании можно было, по его мнению, определенно считать, что, во всяком случае, на солнце железо имеется не в обычном его виде, а разложенным на свои составные части, и что последние в различных пятнах представлены в *неодинаковых количествах* и *обладают неодинаковыми движениями* ¹. Однако к этим широким выводам Локайера большинство физиков отнеслось *скептически*, а многие из них попытались объяснить интересные наблюдения Локайера, *не прибегая к диссоциации наших элементов*. Так, существование в спектре белых звезд якобы единственной кальциевой линии *H'* без следующей за ней линии *H''* Г. В. Фогель ² объясняет тем, что это вовсе *не кальциевая линия*, а лежащая близко от нее *линия водорода*. В самом деле, Ливинг и Дюар ³ наблюдали, что известные спектральные линии некоторых веществ появляются лишь тогда, когда последние находятся в смеси с другими веществами; поэтому *отсутствие* определенных линий железа и кальция они объяснили отсутствием подобных примесей. Аналогичным образом Фогель объясняет и *смещение* отдельных линий, которое, по мнению Локайера должно указывать на движение светящихся масс. Гагенбах заметил, что спектры поглощения жидких растворов зависят от растворителя; а Кундт в соответствии с этим показал, что светлые линии в спектрах газов могут сместиться, если эти газы смешать с другими парами, которые не испускают света или дают сплошной спектр. Ввиду этого Фогель ⁴ приписал наблюдаемое Локайером смещение линий железа не *движению*, а *различным примесям* сильно рассеивающих газов к парам железа в различных местах солнца и высказал мысль, что во-

¹ „Comptes rendus“, XCII, стр. 904, 1881; „Nature“, XXIV, стр. 267, 296, 315, 365 и 391, 1881; „Solar physics. The chemistry of the Sun“, „Proc. of the Roy. Soc.“, XXXI, стр. 348; XXXII, стр. 203; XXXIII, стр. 154 и далее.

² „Sitzungsber. d. Berl. Akad.“, стр. 192, 1880; „Nature“, XXI, стр. 410, 1880. ³ „Proc. of the Roy. Soc.“, XXVII, стр. 350, 1878.

⁴ „Sitzungsber. d. Berl. Akad.“, стр. 905, 1882.

СМЕЩЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ 339

обще предположение о том, что на солнце происходит разложение наших элементов на составные части, в настоящее время представляется еще *ненужным*. Таким образом, эту попытку твердо построить на эмпирической основе с помощью физических наблюдений гипотезу о сложности состава наших элементов, которую химики уже давно признали вероятной, следует считать пока еще неудавшейся и, пожалуй, еще на долгое время; по-видимому, в области спектрального анализа наступила пауза как результат некоторого утомления, и физики склонны использовать этот перерыв для подведения итогов и спокойного пересмотра всего сделанного.

Не входя здесь в дальнейшее рассмотрение многочисленных и успешных исследований по спектральному анализу небесных светил, мы должны еще упомянуть о применении гипотезы Доплера к определению собственных движений космических масс с помощью спектрального аппарата, так как в этих работах сказывается дальнейший успех кинетической теории материи. Доплер применил свою идею о влиянии движения среды, излучающей волны, на действие этих волн, прежде всего к объяснению цветов двойных звезд; физики же до сих пор считали его идею применимой только к акустическим проблемам. Правда, Физо еще в 1848 г. в Филоматическом обществе, а в 1850 г. в Парижской академии ¹ наук высказал мысль, что при очень быстром приближении или удалении светящегося тела *должно происходить заметное смещение спектральных линий*; но его указание не встретило отклика. В 1861 г. Э. Мах ² вернулся целиком к идеям Доплера; он тоже объяснил цвета двойных звезд их движением и даже счел возможным, наоборот, использовать цвет звезд для определения элементов их траекторий. Отвечая на возражения, он допустил, что космические скорости могут быть слишком малыми для того, чтобы давать ощутимые глазом изменения цвета, но вместе с тем заявил: *«Впрочем, я должен отметить, что измерения спектра могут еще давать результаты и в тех случаях, когда глаз уже не в состоянии заметить изменения цвета»* ³. Своеобразную мысль о применении доплеровского принципа к определению космических скоростей высказал Клинкерфюс ⁴. Он указал, что хотя от движущегося источника света глаз наш в течение определенного промежутка времени и получает больше импульсов, чем от неподвижного, однако при этом ни длина волны, ни окраска соответствующего света не изменяются, так как красный цвет при укорочении длины его волны восполняется инфракрасным, а фиолетовый при укорочении длины волны переходит в ультрафиолетовый. Но, с другой стороны, движение источника света должно проявиться в смещении всего спектра; а по отношению к бесцветному лучу, даваемому ахроматической призмой

¹ „L'Institut" Nr. 784, 1849; заявка на право приоритета в „Comptes rendus", LXIX. стр. 743, 1869.

² „Pogg. Ann.", CXII, стр. 58, 1861; CXVI, стр. 333, 1862. — Ernst Mach (1838—1916) — профессор физики Пражского университета (известный философ).

³ „Pogg. Ann.", CXVI, стр. 338.

⁴ „Göttinger Nachr.", стр. 157, 210, 376, 1865; стр.33, 1866. — E.Fr. Wilh. Klinkerfues (1827—1884) — директор обсерватории в Геттингене.

340 СКОРОСТЬ ЗВЕЗД

(все свои наблюдения он производил такими призмами), оно должно проявиться в изменении преломления этого луча по сравнению с лучом, идущим от неподвижного источника света. Изменение преломления зависит от скорости, с которой световые фазы распространяются в луче. Если скорость распространения света в одной среде равна v , в другой v_1 , а скорость самого источника света равна g , то скорость, с которой световые фазы распространяются в обеих средах, равна соответственно $v+g$ и v_1+g ; а показатель преломления, вместо v/v_1 равен $(v+g)/(v_1+g)$, откуда можно определить величину скорости v . Однако проведенные с этой целью измерения Клинкерфюса не дали никакого результата. Поэтому Зонке¹ в мае 1867 г. в своем отзыве о работах Клинкерфюса вновь высказал мысль о необходимости обратиться к наблюдению спектральных линий. «Если звезда, — говорит он, — излучает такой же свет, как и солнце, но обладает большой скоростью, то темные линии в ее спектре должны быть несколько смещены по сравнению с линиями солнечного спектра, и по величине этого смещения можно было бы судить о скорости движения звезды»². В том же году Секки пытался исследовать в этом отношении спектр неподвижных звезд, но безуспешно³. Успехом увенчались наблюдения Геггинса⁴, произведенные почти одновременно с наблюдениями Секки. Последний наблюдал в спектре Сириуса смещение водородной линии F на 0,04 части микрометрического деления по сравнению со спектром гейслеровской трубки и отсюда исчислил *ежесекундное увеличение расстояния Сириуса от земли на 47,3 км*; следовательно, если принять в расчет движение земли, скорость *собственного движения Сириуса* определилась в 66,6 км в секунду. Для того чтобы сделать ненужным сравнение спектра звезд со спектрами искусственных источников света и создать возможность наблюдения менее ярких неподвижных звезд, Целльнер сконструировал так называемый *реверсивный спектроскоп*⁵, который был устроен следующим образом. Полоска света, полученная с помощью щели или цилиндрической чечевицы, находилась в фокусе собирательной чечевицы, которая превращала ее в пучок параллельных лучей. После этого лучи проходили через две системы призм а *vision directe* Амичи⁶, которые были установлены рядом таким образом, что каждая из них пропускала половину лучей, идущих к ним из объектива коллиматора, и ребра которых лежали на противоположных сторонах, так что вся масса лучей разлагалась на два спектра, имевших

¹ „Pogg. Ann.", CXXXII, стр. 279, 1867.

² „Pogg. Ann.", CXXXII, стр. 292.

³ „Comptes rendus", LXVI, стр. 398, 1867.

⁴ „Phil. Trans.", стр. 529, 1868. — William Huggins (родился в 1824 г.)—английский астроном.

⁵ „Pogg. Ann.", CXXXVIII, стр. 32, 1869.

⁶ Парижский оптик J. G. Hofmann утверждал („Cosmos", XXII, стр. 384, 1863), что он первый устроил спектроскоп а *vision directe*, но что идея его устройства принадлежит Амичи.—Giov. Batt. Amici (1786—1863) — профессор астрономии во Флоренции.

РЕВЕРСИОННЫЙ СПЕКТРОСКОП 341

противоположные направления. Далее, объектив зрительной трубы был разрезан пополам перпендикулярно к горизонтально расположенным преломляющим ребрам призм, причем каждую половину можно было микрометрически перемещать как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости. Благодаря такому устройству каждое изменение спектра, которое проявлялось в смещении линий, удваивалось, так как в каждом спектре смещение происходило в противоположном направлении. По словам Целльнера Максвелл, в соответствии с прежними исчислениями Эйзенлора, показал, что средней скорости земли в 4 мили должно соответствовать смещение спектральных линий на $\frac{1}{10}$ расстояния между линиями натрия; поэтому он полагал (конечно, до работы Геггинса), что измерение таких перемещений «с помощью наших инструментов» невозможно. Теперь же Целльнер нашел, что с помощью его реверсионного спектроскопа можно определить с точностью до $\frac{1}{226}$ расстояние между обеими линиями D; следовательно, этот прибор дает возможность измерить космические скорости, не превышающие частей мили. Тем не менее, это спектроскопическое измерение скоростей движения космических тел представляется еще очень трудным и ненадежным, так как на него очень сильно влияют вредные помехи, и, прежде всего — трудно устранимое нагревание призм. Так, Г. Крюсс¹ наблюдал значительное смещение спектральных линий даже при небольших изменениях комнатной температуры, причем различные призмы давали смещение в различные стороны; точно так же и Г. Мюллер² констатировал зависимость преломления, а равно и дисперсии света от изменения температуры.

Спектральный анализ исходил из предположения, что обычные призмы изменяют проходящий через них свет только в том смысле, что они не в одинаковой степени отклоняют лучи различных цветов и тем самым расчленяют свет на его составные цвета. Конечно, было известно, что каждое вещество *поглощает* некоторую часть света, причем различные вещества поглощают его в различных пропорциях, но в то же время считали возможным допустить, что поглощение не оказывает какого-либо иного действия на прошедший уже свет. Считалось общепризнанным, что хотя величины преломления и дисперсии возрастают и убывают с оптической плотностью вещества, но все же они связаны с длиной волны таким образом, что *большая длина волны всегда обуславливает меньшую преломляемость, и обратно*. Последнее положение вытекало из всех предшествующих теоретических выводов, в основании которых всегда лежала *зависимость преломления только от оптической плотности рассматриваемой среды и от длины волны* рассматриваемого луча света. Однако в последний период физики наблюдения показали, что указанное представление о взаимодействии между колебаниями эфира и движениями весоных частиц вещества является слишком узким и что и в данной области движения частиц весомой материи оказывают большее влияние, чем это предполагали до сих пор.

¹ „Ber. d. Deutsch. chem. Ges.“, XVII, стр. 2732, 1884.

² „Beiblätter zu Wied. Ann.“, X, стр. 279, 1886.

342 АНОМАЛЬНАЯ ДИСПЕРСИЯ

В 1862 г. *ле-Ру*¹ заметил, что пары йода, поглощающие среднюю часть спектра и пропускающие лишь крайние красные и синие лучи, в противоположность другим телам, преломляют синие лучи слабее, чем красные. Этот случай преломления он тогда же назвал сохранившимся до сих пор термином *аномальной дисперсии*; в остальном это явление не обратило на себя особого внимания. Лишь восемь лет спустя Христиансен² опубликовал другое аналогичное наблюдение. Глядя через полую призму, наполненную *раствором фуксина*, на ярко освещенную щель, он увидел, что спектральные цвета, вместо обычного порядка от красного до фиолетового, идут частично в измененном порядке: фиолетовый, красный и желтый. Таким образом, от фраунгоферовой линии *B* до линии *D* показатель преломления фуксина возрастал, как обычно, а затем до *G* он быстро убывал, после чего он опять несколько возрастал. Вслед за Христиансеном вопросом об аномальной дисперсии занялся А. Кундт³, который эмпирическим путем установил *общие законы* этого явления. Он сначала испробовал целый ряд тел, обладающих *металлическим блеском*, подобно фуксину, а затем распространил свое исследование на все тела с так называемой *поверхностной окраской*⁴. Таким образом, он сначала исследовал *анилиновую синь, анилиновую фиолетовую, анилиновую зелень, индиго* (растворенное в дымящейся азотной кислоте), *индигокармин, мурексид* (растворенный в калийном щелоке), *цианин, марганцовокислое кали*; затем — *ализарин* (в калийном щелоке), *орселлин, лакмус, экстракты красного, синего и сандалового дерева, корень алканны, кровь, гематин, хлорофилл и т. д.* При этих исследованиях он установил, что тела, *сильно отражающие* известные цвета, эти самые цвета *сильно поглощают*, так что в спектре света, прошедшего через подобные тела, поверхностные цвета должны отсутствовать по *двум* причинам. Показатели преломления таких тел для указанных цветов не поддаются непосредственному наблюдению в спектре, но

¹ „Dispersion anormale de la vapeur d'iode", „Comptes rendus", LV, стр. 126, 1862; также „Pogg. Ann.", CXVII, стр. 659. В предшествующей работе („Comptes rendus", LI, стр. 171, 1860) *ле-Ру* только установил, что когда призма была наполнена парами йода, спектр от ярко освещенной щели дал две отдельные полосы, расположенные друг над другом, — одну синюю и другую фиолетовую. Лишь позднее он заметил, что расположение этих цветов было противоположно их порядку в обычном спектре.

² „Pogg. Ann.", CXLI, стр. 479, 1870; CXLIII, стр. 250, 1871; CXLVI, стр. 154, 1872.

³ „Über die anomale Dispersion der Körper mit Oberflächenfarben", „Pogg. Ann.", CXLII, стр. 163; CXLIII, стр. 149 и 259; CXLIV, стр. 128, 1871; CXLVI, стр. 67 и 164, 1872. „Beziehungen zwischen der Dispersion und Absorption des Lichtes", „Pogg. Ann.", юбил. том, стр. 615, 1874.—А. Кундт (1839—1894)—профессор экспериментальной физики в Берлине.

⁴ Это такие вещества, которые прозрачны для отдельных лучей, но другие лучи отражают с металлическим блеском.

Дэль и Баден-Поуэлль уже в 1846 г. показали, что индиго и берлинская лазурь, принадлежащие к веществам с поверхностной окраской, проявляют, подобно металлам, ясные признаки эллиптической поляризации („Pogg. Ann.", CXLII, стр. 165).

АНОМАЛЬНАЯ ДИСПЕРСИЯ 343

есть основание думать, что они исключительно велики или малы ¹ и что показатели преломления соседних цветов очень быстро и значительно приближаются к этим максимумам или минимумам. *Это быстрое приближение цветов, граничащих с полосой поглощения, к аномальным максимумам и минимумам преломления и составляет то, что наблюдали в виде аномальной дисперсии.* Действительно, повсюду, где происходит особое поглощение отдельных цветов, Кундт установил наличие аномальной дисперсии; для зависимости дисперсии от поглощения он установил, как общий закон, *что перед каждой полосой поглощения, если к ней приближаться со стороны более длинных волн (в воздухе), преломление очень быстро возрастает, а при обратном направлении оно очень быстро убывает.* При подходящей концентрации диспергирующего раствора аномальное увеличение или ослабление показателя преломления может дойти до того, что преломление в части спектра, предшествующей абсорбционной полосе, окажется сильнее, чем в последующей части спектра.

Уже в этих работах Кундт высказал мысль, что, вероятно, и отдельные газы и пары с очень большой поглощательной способностью обладают аномальной дисперсией, но тогда он еще сомневался в возможности ее наблюдения ². Однако позднее ему случайно удалось ее наблюдать ³. Приготовляя совместно со своим ассистентом Кольраушем к лекции опыт по обращению светлой линии натрия, он отбросил на экран через вертикальную призму яркий горизонтальный спектр от электрической дуги и, поставив на пути света бунзеновскую горелку, в которой горел кусочек металлического натрия, заметил, что спектр имел своеобразный вид, показанный на приложенном здесь рисунке. Странные изгибы спектра возле темной линии *D* он тотчас



Черт. 13.

¹ О развитии этих идей Кундт („Pogg. Ann.", CXLII, стр. 163) сообщает следующее: „Если принять за основание опыты Жамена с эллиптической поляризацией света, отраженного от металлов, и более поздние опыты Квинке, то из формул Коши, Беера и Эйзенлора следует, что некоторые металлы, например серебро и золото, имеют показатели преломления меньше единицы; таким образом, скорость (света в них) больше, чем в безвоздушном пространстве. Кроме того, из теории Коши, в связи с опытами Жамена, следует, что показатель преломления металлов зависит от угла падения и что в большинстве металлов дисперсия оказывается обратной дисперсии в прозрачных телах, т. е. что свет с меньшей длиной волны в металлах должен преломляться слабее света с большей длиной волны. По-видимому, до сих пор один только Квинке попытался проверить эти выводы на опыте. Явления интерференции света, прошедшего частью через металл, частью через воздух, дали ему для прозрачных модификаций серебра и золота с голубой окраской коэффициенты преломления, меньшие единицы".

² „Pogg. Ann.". CXLIV, стр. 132.

³ „Über anomale Dispersion im glühenden Natriumdampf", „Wied. Ann.", X, стр. 321, 1880.

344 ДИСПЕРСИЯ И ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА

же удачно объяснил *аномальной дисперсией света парами натрия*, которые, благодаря конической форме пламени, должны были действовать, как призма. Эта призма, обращенная преломляющим ребром вверх, дает в свою очередь спектр, и наиболее отклоненная часть последнего должна быть направлена вниз. Изгибы представляют собою части спектра, полученного с помощью этой призмы; их форма показывает, что и здесь, в соответствии с законом Кундта, часть спектра, предшествующая полосе поглощения, отклонена сильнее, чем часть, следующая за ней. Из установленной связи между избирательным поглощением и отражением света Кундт и для газов пришел к выводу, что те газы, которые очень сильно поглощают какой-либо цвет, должны его и сильно отражать и что, следовательно, газы, которые сами по себе не излучают, могут давать в отраженном свете свою особую, свойственную им окраску.

Что касается связи аномальной дисперсии и прежде всего закона Кундта с теорией света, то доказанная им несомненная связь между поглощением света и величиною преломления очень сильно повлияла на *теорию дисперсии* вообще. До этого времени все изменения, претерпеваемые светом при столкновении его с весомой материей, объясняли косвенно особыми *состояниями плотности* эфира в телах. Теперь же была установлена *связь между преломлением и отражением*, с одной стороны, и *поглощением* — с другой, а так как последнего нельзя себе представить иначе, как в виде превращения движений эфира в движения весомой материи, то и другие видоизменения света в телах должны были находить себе объяснение в частичной передаче светового движения молекулам тел. Раньше мы уже упомянули ¹, что в середине шестидесятих годов Буссинеск с успехом шел по этому пути. Он принимал, что эфир везде, как и в пустоте, однороден, что он имеет повсюду одинаковую упругость и одинаковую плотность. Волны эфира, распространяющиеся между частицами тел, изменяются не вследствие особых свойств эфира в телах, а вследствие того, что они частично передают свои движения молекулам тел и, обратно, испытывают влияние со стороны последних. Отсюда уже вытекало основное условие волновой теории, что в телах свет должен распространяться медленнее, чем в пустоте, и отсюда же Буссинеск проще и строже, чем прежде, вывел *френелевские законы двойного преломления, формулу дисперсии, аналогичную формуле Коши, равно как явления круговой поляризации* ². На этой же теоретической основе была затем построена и связь между поглощением и преломлением света, а вместе с тем и теория аномальной дисперсии. Уже в том томе «Pogg. Ann.», в котором появились вторые статьи Христиансена и Кундта, В. Зелльмейер ³ опубликовал *новую теорию дисперсии*, содержащую в себе объяснение *аномальной дисперсии*. Объяснив изменение скорости распространения света в телах частичной передачей

¹ См. стр. 287 первого выпуска настоящей части.

² См. также Verdet-Exner, „Undulationstheorie des Lichtes“, II, стр. 29.

³ „Pogg. Ann.“, CXLIII, стр. 272, 1871. Далее, в „Pogg. Ann.“, CXLV, стр. 399 и 520; CXLVII, стр. 386 и 525.

ТЕОРИЯ ДИСПЕРСИИ 345

движений эфира весомым частицам, он доказал, что молекулы тел, способные поглощать свет с определенной частотой колебаний, способны в то же время изменять показатели преломления света с иной частотой колебаний, и притом таким образом, что показатель преломления света с частотой колебаний, превышающей частоту поглощаемого света, увеличивается, а у света с частотой колебаний, меньшей поглощаемого, уменьшается. О. Е. Мейер ¹ для объяснения аномальной дисперсии допустил только, что колебания эфирных частиц при прохождении своем через тела встречают сопротивление, но оставил невыясненным, каким образом возникает это сопротивление. К. Пушль ² сделал предположение, что в телах свет распространяется не только в эфире, но и в *атомах тел*, но только в последних он *замедляется*. Поэтому, если атомы особенно медленно распространяют какой-либо род света, то они не только очень сильно отражают и преломляют этот свет, но и особенно сильно его поглощают — свет быстро угасает в результате бесчисленных внутренних отражений. Таким образом, *медленное распространение* света в атомах естественно связывает между собою *сильное поглощение, сильное отражение и сильное (аномальное) преломление* света в телах. Более детально исследовал вопрос о сопротивлениях, встречаемых движением эфира в телах, Гельмгольц в работе 1874 г. «Zur Theorie der anomalen Dispersion» («К теории аномальной дисперсии») ³. Движения эфира и движения весомых частиц он выразил в двух *формулах*. Первая давала в виде дифференциального уравнения *силу свободного эфира*, выраженную через сумму тех движений, которые остались еще у эфира в телах, и тех движений, которые перешли с эфира к весомым частицам. Другое дифференциальное уравнение представляло *силу колебаний весомых атомов* в виде силы, сообщаемой им эфиром, уменьшенной на силу сопротивления, оказываемую движущейся части массы со стороны частей материальной массы, остающейся в относительном покое (если таковая существует) ⁴, и уменьшенной еще на ту часть силы, которая

¹ „Pogg. Ann.“, CXLV, стр. 80, 1872.

² „Wiener Sitzungsber.“, LXVIII, стр. 446, 1873.

³ „Pogg. Ann.“, CLIV, стр. 582, 1875; также „Monatsber. d. Berl. Akad.“, октябрь 1874; перепечатано в „Wissensch. Abhandl.“, II, стр. 213. О теории Зелльмейера Гельмгольц говорит, что хотя она и поясняет существенные стороны явлений аномальной дисперсии, но для случая поглощения света не вводит никакой силы, которая могла бы уничтожить механическую работу колебательного движения и превратить ее в теплоту, и что в данном случае теория прибегает к таким соображениям, которые пока еще не поддаются аналитической обработке. Поэтому он попытался видоизменить объяснение Зелльмейера, введя силу трения, противодействующую движению весомых частиц — в том виде, в каком она оправдалась при применении ее к более медленным качаниям маятника и звуковым колебаниям тел, где она привела к теории резонанса, хорошо согласующейся с опытом.

⁴ По этому поводу Гельмгольц делает следующее замечание („Pogg. Ann.“, CLIV, стр. 585). „Здесь опять-таки в интересах упрощения расчета сделаем предположение, не вполне, может быть, соответствующее действительности, но допустимое с точки зрения механики, — что тяжелые центральные массы молекул остаются неподвижными, а подвижные части молекул стремятся сохранить известное положение равновесия относительно этих центральных масс и относительно эфира“.

346 ФОТОМЕТРИЯ

в результате процесса, схожего с трением, перешла в теплоту и, таким образом, поглотилась. Путем интегрирования этих уравнений Гельмгольц получил формулы для скорости распространения света и вместе с тем для отношения между длинами волн и показателями преломления, которые действительно оказались зависящими от коэффициентов поглощения. Из этих же формул, в зависимости от того, принимался ли коэффициент поглощения равным нулю или же ему давалось большее значение, получались законы нормальной и аномальной дисперсии. Из тех же исходных предпосылок о взаимодействии между движениями эфира и весомой материи исходил Кеттелер¹ при обосновании своей теории дисперсии. Он только более подробно вошел в рассмотрение тех сил торможения и сопротивления, которые проявляются при этом со стороны весомых частиц.

Спектральный анализ вплоть до последнего времени больше всего привлекал внимание физиков-экспериментаторов, поэтому наряду с ним могли более или менее успешно развиваться лишь немногие отрасли оптики. Одной из подобных отраслей была *фотометрия*, так как она не только служила подспорьем для спектрального анализа при изучении небесных тел, но имела также очень важное значение для все более развивавшейся тогда *техники освещения*. Известно, что глаз в качестве измерительного аппарата для определения интенсивности света зависит в высокой степени от множества субъективных условий и допускает лишь относительные измерения; поэтому усилия исследователей были направлены к тому, чтобы помимо усовершенствования бывших уже в ходу фотометров построить такие приборы, которые были бы более независимы от субъективной оценки силы света и давали бы возможность определять силу света в *абсолютных единицах*. Наиболее сильный толчок в этом направлении был дан Целльнером, начавшим в 1857 г. свою научную деятельность фотометрическими работами, предпринятыми им, по-видимому, под влиянием Зейделя и Вильда. Зейдель, занимавшийся в 1846 г.² сравнением яркости различных планет и неподвижных звезд первой величины с наиболее яркой звездой Вега в созвездии Лиры, применял для этой цели фотометр Штейнгеля³, представлявший собой зрительную трубу с разрезанным объективом, с помощью которого можно было получать рядом изображения сравниваемых звезд. Измерения Зейделя хорошо совпадали с результатами измерений Гершеля⁴. Но Вильд⁵ незадолго

¹ „Pogg. Ann.“, юбил. том, стр. 166, 1874; „Verhandl. d. nat. Ver. f. Rheinland-Westphalen“, 33-й год, стр. 197; „Pogg. Ann.“, CLX, стр. 466, 1877; там же, дополнительный том VIII, стр. 444, 1878; „Wied. Ann.“, 1879, 1880 и т. д. E. Ketteler (родился в 1836 г.) — профессор физики в Бонне.

² „Münch. gelehrte Anzeigen“, XXIII, стр. 1, 1846; „Abhandl. d. Münch. Akad.“, VI, 3 отдел, 1852. — Ph. L. v. Seidel (родился в 1821 г.) — профессор математики Мюнхенского университета.

³ „Pogg. Ann.“, XXXIV, стр. 644, 1835.

⁴ Так, он получил: Сириус 5,13; Арктур 0,84; Альдебаран 0,36; Денеб 0,35; Марс (24 августа 1845 г.) 6,80; Юпитер (1 сентября 1845 г.) 8,50.

⁵ „Pogg. Ann.“, XCIX, стр. 235. Полная теория в „Pogg. Ann.“, CXVIII, стр. 193. О принципах своего прибора Вильд говорит: „Нейман в Кенигсберге в своих лекциях по оптике коснулся теории прибора, с помощью которого

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЦЕЛЛЬНЕРА 347

до Целльнера, в 1856 г., описал новый вид фотометров, в которых ослабление нормального света до равенства его с измеряемым светом достигалось не удалением первого от прибора, а с помощью поляризации. *Поляризованный фотометр Целльнера*¹, или *астрометр*, как его назвал Целльнер в связи с преимущественным применением его, в последней своей конструкции состоит из зрительной трубы, в нижнем конце которой, в том месте, где получается изображение, даваемое объективом, установлена под углом в 45° к оси плоскопараллельная необоженная стеклянная пластинка. В этом же месте к зрительной трубе присоединяется другая труба, которая направлена под прямым углом к оси зрительной трубы и под углом в 45° к стеклянной пластинке. На внешнем конце этой боковой трубки имеется маленькое отверстие, через которое проходит свет керосиновой лампы постоянной яркости; далее, с помощью собирающей линзы этот свет концентрируется и дает изображение рядом с тем изображением, которое получается от объектива зрительной трубы. Для того чтобы интенсивность света полученной таким образом «искусственной звезды» свести к интенсивности света изображения естественной звезды, наблюдаемой через зрительную трубу, в боковой трубке помещены две никелевые призмы. Ближайшая к зрительной трубке призма установлена неподвижно, другая призма, установленная ближе к лампе, может вращаться, и снабжена делительным кругом для отсчета вращения. Степень ослабления лампового света при вращении николя определяется по закону косинусов Малюса. Этот фотометр был предназначен для измерения интенсивности точечных источников света; для сравнения излучающих свет поверхностей служил другой фотометр подобной же конструкции, в котором поле зрения наполовину освещалось исследуемым источником света и наполовину нормальным светом. Далее, для того чтобы иметь возможность сравнивать между собою *источники света с различной цветной окраской*, Целльнер поместил в боковой трубке перед вращающимся николем пластинку из кварца, а перед нею еще третью николевскую призму, вращением

можно, пользуясь частично поляризованным светом, определить отношение между интенсивностью естественного и поляризованного света. А именно, если от обоих сравниваемых источников света получить два пучка совпадающих по своему направлению лучей, поляризованных перпендикулярно друг к другу, то результирующий луч будет производить впечатление частично поляризованного света, если оба перпендикулярно друг другу поляризованных составляющих его будут неодинаково сильны, и, наоборот, он будет казаться естественным светом, если оба его составляющих будут равны. Если при этом имеется средство изменить по желанию поляризованные составляющие и затем точно определить ту точку, где они оба становятся равными, т. е. путем взаимной поляризации дают естественный свет, мы тотчас же получаем возможность определить отношение интенсивностей обоих источников света, если только для точки нейтрализации мы можем установить, сколько естественного света поляризовано в каждом луче, идущем из данного источника".

¹ Фотометрические работы Целльнера: „Photometrische Untersuchungen“, „Pogg. Ann.“, С, стр. 381, 474 и 651, 1859; там же, СІХ, стр. 244, 1860; „Grundzüge einer allgemeinen Photometrie des Himmels“, Berlin 1861; „Photometrische Untersuchungen mit besonderer Rücksicht auf die physikalische Beschaffenheit der Himmelskörper“, Leipzig 1865; выводы из последних работ изложены также в „Pogg. Ann.“, СХХVІІІ, стр. 260, 1866.

348 АСТРОФОТОМЕТР

которой он мог придавать нормальному свету любую цветную окраску. Тем не менее, сравнение разноцветных источников света оказалось ненадежным; исследование же одноцветных источников света дало в среднем результаты, согласные с теми, которые получил Зейдель с помощью штейнгелевского фотометра с призмами. Р. Энгельман, находившийся в Индии во время большого солнечного затмения 1868 г. и занявшийся там сравнением света различных звезд при помощи астрофотометра, получил результаты, вполне согласные с данными Гершеля, полученными им в 1834 — 1838 гг. Ниже приведены некоторые из полученных Целльнером результатов, касающихся сравнительной силы света планет:

					$\%$
<u>Солнце</u>	618 000 (или 619 000)	с вероятной ошибкой . . .			в 1,6 (2,7)
Полная луна					
<u>Солнце</u>	6 994 млн.	"	"	"	5,8
Марс					
<u>Солнце</u>	5 472 "	"	"	"	5,7
Юпитер					
<u>Солнце</u>	130 980 "	"	"	"	5,0
Сатурн					
<u>Солнце</u>	8,486 блн.	"	"	"	6,0
Уран					
<u>Солнце</u>	79,620 "	"	"	"	5,5
Нептун					

Отсюда для величины, представляющей отношение между светом, падающим на планету, и светом, от нее отраженным, Целльнер получил следующие числа:

Луна	0,1736	Сатурн	0,4981
Марс	0,2672	Уран	0,6400
Юпитер	0,6236	Нептун	0,4648

Для сравнения он привел соответствующие числа для некоторых земных тел:

Свежевыпавший снег	0,783	Темносерый сиэнит	0,078
Белая бумага	0,700	Ртуть	0,648
Белый песчаник	0,237	Зеркальный металл	0,535
Мергель	0,156	Стекло	0,040
Кварцевый порфир	0,108	Обсидиан	0,032
Влажная пашня	0,079	Вода	0,021 ¹

Значительный шаг вперед в деле сравнения интенсивности *различно окрашенных источников света* сделал К. Фирордт², соединивший спек-

¹ „Pogg. Ann.", CXXVIII, стр. 263—266.

² „Die Anwendung des Spectralapparates zur Messung und Vergleichung der Stärke des farbigen Lichtes", Tübingen 1871. „Die Anwendung des Spectralapparates zur Photometrie der Absorptionsspectra und zur quantitativen chemischen Analyse", Tübingen 1873. Реферат в „Jahrbuch der Erfindungen", IX, стр. 70,— К. v. Vierordt (1818 — 1884) — профессор физиологии в Тюбингене.

ФОТОМЕТР ДЛЯ ОКРАШЕННОГО СВЕТА 349

троскоп с фотометром и получавший в нем спектр от нормального источника, соответствующую часть которого он сравнивал с исследуемым окрашенным светом. При этом Фирордт, главным образом, поставил себе целью провести измерение поглотительной способности различных прозрачных веществ по отношению к *различным частям спектра*. С этой целью он наполовину прикрывал входную щель большого спектроскопа слоем исследуемого прозрачного вещества, так что получалось два спектра; спектр поглощения и нормальный, расположенные один над другим. Для того чтобы иметь возможность выделить из спектра ту или другую часть его для наблюдения, в зрительной трубке спектрального аппарата перед окуляром на месте нитяного креста были устроены две подвижные, непроницаемые для света задвижки, а для ослабления света нормального спектра до интенсивности спектра поглощения задвижки входной щели были составлены из двух верхних и нижних частей, благодаря чему можно было расширять и суживать независимо друг от друга верхнюю и нижнюю ее половины; при этом ослабление нормального спектра могло также осуществляться с помощью дымчатых стекол, обладающих определенной ослабляющей способностью. Вполне понятно, что таким же образом можно было сравнивать друг с другом различные части спектра прямого света. Указанным методом Фирордт, приняв общую интенсивность солнечного спектра равной 1 000 000, получил для отдельных частей его следующие числа:

От линии <i>A</i> до линии <i>a</i> . . .	72	От линии <i>D</i> до линии <i>E</i> . . .	478 544
" " <i>a</i> " " <i>B</i> . . .	1 592	" " <i>E</i> " " <i>F</i> . . .	186 143
" " <i>B</i> " " <i>C</i> . . .	4 114	" " <i>F</i> " " <i>G</i> . . .	36 190
" " <i>C</i> " " <i>D</i> . . .	288 957	" " <i>G</i> " " <i>H</i> . . .	4 383

Однако с точки зрения точности измерений с помощью этого прибора метод ослабления света путем сужения или расширения той или другой половины щели вызывает сомнения, так как при этом изменяется не только интенсивность, но и цветной состав соответствующего света. Поэтому Глан ¹ в приборе, устроенном им по принципу Фирордта, снова обратился к методу ослабления света с помощью поляризации; а Г. Фогель ² после этого с большим успехом применил подобный спектрофотометр для своих наблюдений над поглощением света слоями газа, окружающими солнце.

Во всех этих фотометрах измерение все-таки производится на основе субъективного восприятия света; *абсолютная фотометрия*, при которой интенсивность света была бы связана с другими физическими силами и измерялась бы при помощи последних, пока еще оставалась в проекте. В 1875 г. В. Сименс ³ изготовил фотометр, в котором, по крайней мере, непосредственно субъективная оценка на глаз была уже исключена и интенсивность света могла быть выражена в электриче-

¹ „Wied. Ann.", II, стр. 351, 1877.—P. Glan (родился в 1846 г.) — приват-доцент в Берлине.

² „Monatsber. d. Berl. Akad.", стр. 104, 1877."

³ „Revue d. Fortschr. d. Naturw.", III, стр. 438, 1875.

350 АБСОЛЮТНАЯ ФОТОМЕТРИЯ

ских, а следовательно, и в абсолютных единицах. Этот прибор был основан на том явлении, что *электрическая проводимость кристаллического селена под влиянием освещения изменяется*. В цепь тока от элемента Даниеля были включены гальванометр и кусок селена; последний освещался светом нормальной свечи, причем последняя перемещалась до тех пор, пока отклонение стрелки гальванометра оказывалось равным тому, какое получалось от исследуемого источника света. Целльнер ¹, исходя из высказанной им в прежних его работах мысли, что интенсивность света равна его живой силе, попытался измерить первую при помощи последней; для этой цели он предполагал измерять действие света на *радиометр*, снабдив последний круговой шкалой, соединенной с крестом радиометра; при этом он допускал, что живая сила световых лучей пропорциональна углу отклонения креста радиометра (во всяком случае, когда крест не делает полного оборота). В это же время неожиданно выяснилось, что для дальнейшего усовершенствования *микроскопа* имеется определенный предел. До этих пор полагали, что подобно тому как зрительная труба позволяет проникать все дальше в глубь неизмеримых пространств, так и микроскоп поведет нас все дальше в область неизмеримо малых величин. Однако теперь Аббе и одновременно с ним и Гельмгольц показали, что в последнем направлении мы уже почти дошли до пределов различного и что микроскоп вскоре уже откажется вести нас дальше. Лишь после того как в текущем столетии сложные микроскопы были настолько усовершенствованы, что они могли соперничать по ясности и четкости даваемых изображений с простыми микроскопами, мог быть сделан дальнейший шаг к их улучшению, еще большему увеличению даваемых ими изображений. Около 60-го года известные оптики Гартнак и Мерц и сыновья, следуя идее Амичи, устроили свои так называемые *иммерсионные системы*, при употреблении которых между объективом и покровным стеклышком вместо воздуха помещается какая-нибудь жидкость, например вода, глицерин или маковое масло ²; это устройство дало возможность сразу сильно повысить разрешающую способность микроскопа. Однако возникшим в связи с этим надеждам, что в дальнейшем этим путем удастся добиться дальнейшего усиления увеличительной способности микроскопов, был положен конец в 1874 г. статьей Аббе «Über die Grenzen der Leistungsfähigkeit

¹ „Das Scalen-Photometer, ein neues Instrument zur mechanischen Messung des Lichtes, nebst Beiträgen zur Geschichte und Theorie der mechanischen Photometrie, Leipzig 1879. Сам Крукс тоже рекомендовал использовать изобретенный им радиометр в качестве фотометра („Nature", XIII, стр. 392 и 452, 1876)

² Гартинг говорит о первых иммерсионных системах („Pogg. Ann", CXIV, стр. 82, 1861): „Гартнак в этой системе последовал примеру, данному Амичи в 1850 г., и поместил между покровным стеклом и свободной поверхностью нижней линзы тонкий слой воды... Так как вода сильнее преломляет, чем воздух, то благодаря этому значительно ослабляется, или даже совсем пропадает, отражение света с поверхности объектива. Поэтому в микроскоп попадает большее количество лучей, и, таким образом, тонкий слой воды производит то же самое действие, что и увеличение апертуры микроскопа. Это благоприятное действие, сказывается преимущественно на краевых лучах, падающих наиболее косо... поэтому указанный слой должен повышать разрешающую способность микроскопа".

ПРЕДЕЛЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ МИКРОСКОПА 351

der Mikroskope» («О пределах эффективности микроскопов») ¹. Аббе показал, что возможная степень увеличения микроскопом зависит, главным образом, от дифракции световых лучей. Мы не в состоянии различить таких структурных отношений, отдельные части которых расположены настолько близко друг к другу, что, по крайней мере, первый из отклоненных световых пучков не поступает в объектив одновременно с не отклоненным конусом света. Отсюда следует, что при центральном освещении взаимное расстояние между поддающимися различению частями не может быть меньше длины целой волны применяемого света, а при наиболее косом освещении оно не может быть меньше половины длины волны. Как выше было указано, одновременно и Гельмгольц ² пришел к совершенно тем же результатам, но он дополнил свою работу и теоретическим обоснованием этих результатов, чего не сделал в своем сообщении Аббе. В качестве меры для наименьших различимых объектов Гельмгольц взял такие расстояния между черточками прозрачной дифракционной решетки, при которых эти черточки можно еще ясно отдельно различать ³. Так как можно доказать, что решетка представляется в виде однородной светлой поверхности, когда ширина дифракционных полос равна ширине интервала решетки, то для наименьшего расстояния ϵ , которое может еще быть различаемо в микроскопе, получается формула $\epsilon = \lambda / 2 \sin \alpha$, где λ обозначает длину волны в веществе объекта и α — угол расхождения падающих лучей. Для угла расхождения в 90° получается тогда, как и у Аббе, $\epsilon = \lambda / 2$; или, если принять в расчет только наиболее светлые лучи белого света: для обыкновенного объектива $\epsilon = 1/3636$ мм, а для иммерсионной системы, где между покровным стеклом и объективом имеется вода, получается $\epsilon = 1/4848$; последняя величина, впрочем, в данном случае не вполне достижима ввиду меньшей величины возможного угла расхождения лучей. И действительно, непосредственные измерения с помощью новейших микроскопов показали, что указанное максимальное возможное увеличение почти уже ими достигнуто. Гельмгольц в своей работе отмечает лишь, что применение однородного синего света, ввиду меньшей длины его волны, может дать большее увеличение, чем указанное выше для белого света; однако Аббе в применении обладающих еще более короткой длиной волн *химически активных ультрафиолетовых лучей для фотографирования микро-*

¹ „Schultze's Arch. f. mikrosk. Anatomie", IX, стр. 413, 1874. E. Abbe (родился в 1840 г.) — профессор в Йене.

² „Pogg. Ann.", юбил. том, стр. 557, 1874; также „Wissensch. Abhandl.", II, стр. 185.

³ Подобные стеклянные решетки для исследования увеличительной способности микроскопа впервые предложил и стал изготовлять Ф. Ноберт из Грейфсвальда. В его решетках промежутки между отдельными линиями составляли: 0,001000; 0,000857; 0,00073; 0,000630; 0,000540; 0,00463; 0,00097, 0,000340; 0,000292; 0,000225 парижских линий („Pogg. Ann.", LXVII, стр. 173).

352 МИКРОСКОПИЧЕСКАЯ ФОТОГРАФИЯ

скопических изображений находит средство для еще большего повышения увеличительной способности микроскопов.

И действительно, с этого времени, под влиянием только что указанных идей, начинается поразительное развитие *микроскопической фотографии*, которое до сих пор имело очень слабое применение. Так как в это же время стали все с большим успехом *фотографировать солнце, луну, планеты, звездное небо*, так как по примеру Геггинса стали фотографировать и тем самым закреплять спектры земных пламен, как и небесных тел, и вообще все больше приобретали навык в непосредственной фотографической регистрации разнообразных физических процессов, то фотография стала постепенно переходить из области искусства в область науки, где ее приняли с радостью и большими надеждами. Весьма вероятно, что со временем фотография завоюет себе место во всех отраслях науки и приобретет повсюду то значение, которое она во многих случаях имеет и теперь, — значение общего нелицеприятного протоколиста науки, беспартийного, неопровержимого, вполне надежного свидетеля всех научных исследований, произведенных в кабинетной тиши.

ФИЗИКА ЗВУКОВЫХ ОЩУЩЕНИЙ, МЕХАНИКА ЗВУКОВЫХ ДВИЖЕНИЙ (приблизительно от 1860 до 1880 гг.).

В начале шестидесятых годов оживился также интерес к *акустическим проблемам*, главным образом под влиянием исследования Гельмгольца, составившего в данном вопросе эпоху: «Die Lehre von den Tonempfindungen» («Учение о звуковых ощущениях») ¹, которое в промежутке времени от 1863 до 1877 г. вышло в четырех изданиях. Хотя эта работа, как показывает и самое ее заглавие, была предпринята скорее с физиологическими и музыкальными, чем с физическими, целями, но своим ясным и глубоким отношением к трактуемым вопросам она обогатила всю область акустики и, в конце концов, благотворно повлияла даже на чисто механическую часть этой дисциплины.

Гельмгольц делит все звуковые ощущения на *шумы* и *тоны*. Вторые вызываются быстрыми периодическими движениями звучащих тел, передаваемыми нашему органу слуха волнообразными движениями воздуха, шумы же возникают вследствие непериодических движений. Тон характеризуется тремя моментами: *силой*, *высотой* и *тембром*. Так как сила звука определяется величиной размаха колебаний, а высота тона — продолжительностью каждого колебания, то относительно тембра остается лишь предположить, что он зависит от *формы колебаний*. Различные формы колебаний (при равном размахе и продолжительности их) могут различаться друг от друга лишь *видом* движения в течение периода, различным характером нарастания и убывания скоростей в течение одного колебания. Наиболее простой формой колебаний является такая, при которой скорости колеблющихся частичек изменяются совершенно так же, как при качаниях маятника; поэтому их

¹ Гельмгольц стал разрабатывать эту тему в отдельных научных статьях, начиная еще с 1856 г. В популярной лекции 1857 г., прочитанной им в Бонне (родине Бетховена), „Über die physiologischen Ursachen der musikalischen Harmonie“, содержатся уже основные идеи этой работы (эта лекция напечатана в „Vorträge und Reden“, стр. 79, Braunschweig 1884).

УЧЕНИЕ О ЗВУКОВЫХ ОЩУЩЕНИЯХ 353

называют «маятникоподобными» колебаниями, или же, — так как смещение у колеблющейся точки от положения равновесия в любой момент

$$y = A \sin \frac{2\pi}{T} t^1,$$

времени выражается формулой — также *синусоидальными* колебаниями. Все другие виды колебаний, при которых скорости возрастают до максимума иначе, чем в маятнике, или же при которых в течение периода наряду с абсолютным максимумом существует еще один или несколько относительных максимумов скоростей, можно представить себе происшедшими таким образом, как если бы частицам были сообщены простые колебания с числами колебаний, превышающими число колебаний результирующего сложного колебания в один, два, три и т. д. раз. Это было доказано Фурье в его работе «Théorie analytique de la chaleur» («Аналитическая теория теплоты»), где он показал, что всякое регулярное периодическое движение точки может быть представлено при помощи уравнения:

$$y = A_1 \sin \frac{2\pi}{T} (t - t_1) + A_2 \sin \frac{4\pi}{T} (t - t_2) + A_3 \sin \frac{6\pi}{T} (t - t_3) + \dots$$

Там же им было доказано, что для каждого заданного периодического движения возможно только *единственное подобное разложение* на составные простые колебания и что, следовательно, при заданном сложном движении и составные его части задаются *однозначно*. То, что у Фурье имело чисто механический смысл, у Ома² получило акустическую интерпретацию. Согласно последней ухо воспринимает в качестве *простого тона* только тот звук, который вызван *простым синусоидальным колебанием*; все же прочие звуки разлагаются на тоны, которые соответствуют отдельным членам ряда Фурье и которые могут быть *различаемым в каждом отдельном случае и на слух как основные тоны и добавочные тоны (обертоны)*. В свое время Август Зеебек³ решительно оспаривал правильность этого объяснения, утверждая, что всем частным колебаниям, определяемым при помощи ряда Фурье, хотя бы они и имели свои собственные различные по величине периоды, все-таки присущ и общий период колебаний T ; поэтому он утверждал, что *ухо в действительности воспринимает только основной тон, соответствующий периоду T* . При этом он отметил, что, например, на сирене он никогда не слышал омовских обертонов или же слышал их настолько слабо, что это никак не согласуется с теорией. Он только

¹ Как известно, здесь A представляет амплитуду, T — продолжительность (полного) колебания, а t — время от момента выхода из положения равновесия, считая в положительном направлении.

² „Definition des Tones nebst daran geknüpfter Theorie der Sirene“, „Pogg. Ann.“, LIX, стр. 497, 1843; LXII, стр. 1, 1844. С Омом был согласен и Дюгамель, который в 1848 г. пришел к следующим выводам: „Если колебательное движение точки разложить на несколько других, то движение этой точки будет восприниматься нашим ухом совершенно так же, как если бы на него воздействовало столько же точек, из которых каждая обладала бы одним из составляющих движений“ („Comptes rendus“, XXVII, стр. 455, 1848).

³ „Pogg. Ann.“, LX, стр. 499, 1843; LXIII, стр. 353 и 368, 1844; LXVIII, стр. 449, 1846.

354 ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕЛЬМГОЛЬЦА

допускал, что число членов и величины постоянных в ряде Фурье определяют, быть может, *характер звука* и, прежде всего его *тембр*. Теперь Гельмгольц доказал, что мысль Ома о сложном составе звуков была безусловно правильна и что последнее предположение Зеебека с ней вполне совместимо. А именно, во всяком звуке, наряду с основным тоном, существуют и отдельные обертоны, соответствующие ряду Фурье, которых, правда, без особого навыка и внимания наше ухо отдельно не различает, но которые придают основному тону *особый тембр*¹. Поэтому он постарался прежде всего доказать, что содержа-

¹ „Эту же мысль, а также несколько с ней связанных высказал немного раньше С. Брандт в небольшой статье размером в 11 стр. in octavo: „Über die Verschiedenheit des Klanges“ („Pogg. Ann.“, СХІІ, стр. 324—336). В подкрепление своей мысли он указывает на следующее: „Числа обертонов с их различным отношением силы и высоты дают достаточное количество элементов для объяснения различия тембров. Опытное ухо в состоянии даже отличить обертоны от основного тона, а также друг от друга, в звуке колеблющейся струны и в колебаниях воздушного столба. В звуках кишечных струн можно слышать только 7—8 обертонов, а в звуках металлических больше 13. Вероятно, металлический характер звука и объясняется этим соединением быстро следующих друг за другом высоких тонов. В звуках металлических духовых инструментов тоже наблюдается преобладание высоких обертонов по сравнению с звуками деревянных духовых инструментов. Этим же различием обертонов объясняется, вероятно, и различие гласных звуков, обертоны которых, начиная от *и* до *і*, с повышением тона становятся все сильнее. Но, пожалуй, еще убедительнее тот факт, что на одной и той же струне, приводя ее в колебания, в различных местах по ее длине можно добиться уничтожения некоторых обертонов, вследствие чего существенно изменяется характер тона (его тембр). Особенно обращают на себя внимание глухой, как бы пустой, тон при ударе посредине струны и резкий, „светлый“ тон при ударе около конца струны. Нижеследующие примеры поясняют это всего лучше. Первый из них показывает обертоны

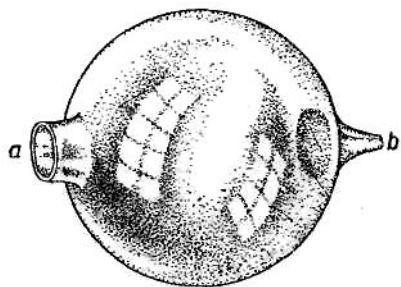


Черт. 14.

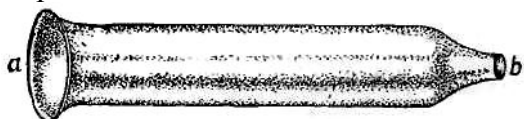
к большому *C*, полученные при ударе, делящем струну на несоизмеримые части; второй дает обертоны при ударе посредине струны; третий при ударе на расстоянии $\frac{1}{3}$ или $\frac{2}{3}$ ее длины; четвертый — при ударе на расстоянии $\frac{1}{4}$ или $\frac{3}{4}$ ее длины. Все эти ряды тонов были вполне согласованно получены как путем опыта, так и путем расчета (из ряда Фурье)". В противоположность Зеебеку Брандт слышал подобные обертоны и при звучании сирены. В примечании к своей статье Брандт говорит следующее: „Настоящая статья была мною написана летом 1865 г. в течение нескольких дней не с целью ее опубликования, а с тем, чтобы передать ее проф. Гельмгольцу. Этот ученый отозвался о ней одобрительно и сказал, что по его мнению, указание на связь между тембром и гласными звуками представляет наиболее интересную часть моей работы, которая заслуживает более детальной разработки. Несколько лет спустя после того как появилась его гениальная работа о тембре гласных, он через

ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕЛЬМГОЛЬЦА 355

щимся в сложном звуке *простым тонам* соответствуют особые *механические действия* во внешнем мире, на основании которых можно установить их *объективную природу*, *независимо от человеческого уха* и его ощущений и независимо от теоретических соображений о разложении сложных колебаний на простые синусоидальные колебания. Для этой цели он воспользовался преимущественно явлениями *резонанса*; он показал, что натянутая перепонка может резонировать не только на звук, равный по высоте ее собственному тону, но и на звуки, в которых собственный тон мембраны содержится как *обертон*. Подобные же, хотя и более сложные отношения были им установлены и для струн и вообще для всех упругих тел. В качестве наиболее чувствительных приборов для исследования звуков на содержащиеся в них обертоны он предложил применять устроенные им *резонаторы*, т. е. стеклянные или металлические полые шары или трубки, изображенные на приложенных черт. 15 и 16. Если подобный резонатор вставить узким концом возможно плотно в ухо, то большинство тонов, раздающихся кругом, бывает слышно значительно более тихо, чем обычно, но зато обертон звука, соответствующий по своей высоте собственному тону резонатора, бывает слышен чрезвычайно громко. Эти приборы Гельмгольца дают возможность производить *анализ* сложного звука и лицам, не обладающим соответствующим навыком и лишенным музыкального слуха; благодаря этому теория тембра стала доступной для всякого ¹. Поэтому Гельмголец считает доказанным, *что при помощи чисто механического средства, вроде резонирующего тела, из сложной звуковой массы может быть выделен любой*



Черт. 15.



Черт. 16.

профессора Ришело передал мне свое сожаление, что я не опубликовал своей статьи, и просил меня сделать это хотя бы теперь. Это пожелание я ныне и выполняю". Следует отметить, что и Гальда еще в 1851 г. высказал предположение, что различие тембров зависит, быть может, от обертонов, сопровождающих основной тон („Comptes rendus", XXXIII, стр. 503, 1851).

¹ Эти резонаторы Гельмголец описал в работе „Über die Klangfarbe der Vocale", которая была доложена в заседании Баварской академии наук 2 апреля 1850 г. („Pogg. Ann.", CVIII, стр. 287, 1859). Брандт в упомянутой выше работе высказался очень сдержанно по вопросу о возможности различения обертонов: он полагал, что на это способно лишь очень музыкальное ухо, и выразил сожаление, что в силу этого обстоятельства данные вопросы интересуют лишь отдельных немногих лиц, почему и надежда на их разрешение очень слаба („Pogg. Ann.", CXII, стр. 336).

356 ТЕМБР ЗВУКА

входящий в ее состав простой тон и что в звуке музыкального инструмента может содержаться любой простой тон совершенно в таком же смысле, в каком в составе белого цвета солнца или раскаленного тела содержатся различные цвета радуги. Исследовав затем в следующей главе вопрос о том, в какой мере каше ухо способно без помощи искусственных вспомогательных средств различать обертоны и воспринимать их отдельно от основного тона, он приходит к следующим выводам: 1) «Обертоны, соответствующие простым колебаниям в сложном движении воздуха, воспринимаются нами (перцепируются), хотя и не всегда доходят до сознания (апперцепируются); 2) они могут быть доведены до сознания, или апперцепированы, и без всякого искусственного средства, одним лишь надлежащим направлением внимания; 3) однако, и в том случае, когда обертоны отдельно не воспринимаются, а растворяются во всей звуковой массе, их существование в нашем ощущении выражается в изменении тембра звука, причем большая высота их тонов характерным образом выражается в том, что самый тембр кажется ярче и выше по тону»¹. Вместе с тем, однако, Гельмгольц считает необходимым несколько сузить понятие тембра по сравнению с распространенным неясным представлением о нем. Он определенно исключает из этого понятия многое такое, что до сих пор всегда ставилось с ним в связь, а именно, все те особенности звука, которые он приобретает при более или менее постепенном появлении или затухании тона, равно как все те сопутствующие шумы, которые подобно звукам согласных характеризуют тоны духовых инструментов и т. п. Таким образом, под музыкальным тембром он подразумевает только те особенности звука, которые соответствуют длительным равномерным и правильным периодическим движениям воздуха и которые, следовательно, могут быть объяснены только наличием обертонов.

После этого он переходит к детальному исследованию зависимости различных тембров от отдельных сопровождающих их обертонов, и результаты этих исследований формулирует в следующих положениях: «1) *Простые тоны*, каковы, например, звуки камертонов с резонирующими трубками и звуки широких закрытых органных труб, звучат очень мягко и приятно, без всяких хрипов, но слабо, а в низких тонах глухо; 2) *Сложные тоны*, в которых основной тон сопровождается умеренной силы *низшими обертонами* приблизительно до шестого,— звучат полнее и музыкальнее предыдущих. По сравнению с простыми тонами они богаче и красивее, но они остаются мягкими и благозвучными до тех пор, пока в них отсутствуют очень высокие обертоны. Сюда относятся звуки *фортепиано*, *открытых органных труб*, более мягкие *piano* человеческого голоса и *роговых* инструментов. Последние уже представляют собой переход к звукам с высокими обертонами, тогда как *флейты* и слабые звуки флейтового регистра в органе приближаются к простым тонам; 3) при наличии одних только *нечетных обертонов*, как это бывает в *узких закрытых органных трубках*, в *струнах форте-*

¹ „Die Lehre von den Tonempfindungen“, 4 изд., стр. 111—112, Braunschweig 1877.

СИНТЕЗ ГЛАСНЫХ ЗВУКОВ 357

пиано, ударяемых посредине, и в *кларнете*, звук становится *глухим*, а при большем числе таких обертонов — *гнусливым*. Когда основной тон преобладает по своей силе над обертонами, звук бывает *полным*, в противном случае он — *пустой*. Так, звук широких закрытых органных трубок полнее, чем звук узких; звук струн бывает полнее при ударе фортепианным молоточком, чем при ударе палочкой или при щипке пальцем; тон язычковых инструментов при надлежащей надставке бывает полнее, чем без нее; 4) когда очень ясно слышны *высокие обертоны* дальше шестого или седьмого, то звук становится резким и шероховатым. Причина этого будет показана ниже при рассмотрении диссонансов, возникающих между высокими обертонами. Степень резкости звука может быть различной: при меньшей силе звука высокие обертоны не влияют существенно на музыкальность звука; они даже, наоборот, выгодны для характерности и выразительности музыки. Из этого вида звуков особенно важны звуки *смычковых инструментов*, большинство *язычковых трубок*, *гобоя*, *фагота*, *фисгармонии* и *человеческого голоса*. Более шероховатые резкие звуки *медных инструментов* производят впечатление большей силы по сравнению с подобными же, но мягкими по тембру звуками. Поэтому сами по себе они мало пригодны для воспроизведения художественной музыки, но производят очень сильное действие в оркестре. Каким образом высокие диссонирующие между собой обертоны придают звуку более пронзительный характер, об этом будет изложено ниже ¹». Но бесспорно наибольшее внимание обратил на себя в исследовании Гельмгольца блестящий успех произведенного им *синтеза гласных звуков* ². При помощи чрезвычайно остроумных приборов Гельмголец поддерживал в состоянии длительного колебания ³ ряд настроенных камертонов, а при помощи резонаторов он по желанию усиливал или ослаблял издаваемые ими тоны. Сначала он для своих опытов применял в качестве основного тона камертон с высотой тона *B*, а в качестве обертонов семь других камертонов с тонами *b*, *f*, *b'*, *d*, *f*, *as* и *b*. Когда резонатор открывали перед камертоном *B*, слышалось глухое *U*; если одновременно с ним звучали *b* и *f*, звук напоминал *U*, напеваемое басом. Гласная *O* получалась при слабом звучании *B*, сильном звучании *b* и одновременном слабом звучании *b'*, *f* и *d*. *A* или, правильнее, *A* получалось при наиболее сильном звучании высших обертонов от пятого до восьмого. Для воспроизведения более высоких гласных Гельм-

¹ „Die Lehre von den Tonempfindungen“, 4 изд., стр. 192—193.

² Rob. Willis [(1800—1875), духовное лицо, профессор физики] пытался в 1829 г. воспроизвести гласные звуки с помощью язычковых инструментов („Trans. of the Cambridge Phil. Soc.“, III, стр. 231, 1829). В своем критическом отзыве об этих опытах Уитстон высказал мысль, что гласные звуки составлены из основного тона и обертонов („London and Westminster Review“, October 1837).

³ Гельмголец применял для этой цели электромагнитный прерыватель, действие которого регулировалось камертоном, замыкавшим и размыкавшим ток наподобие молоточка Нефа. Благодаря этому звучание камертона могло поддерживаться неопределенно долгое время. С той же целью Рудольф Кениг в 1866 г. присоединил к камертону часовой механизм, ход которого регулировался камертоном и который в свою очередь сообщал камертону толчок при каждом его колебании, благодаря чему движение последнего оставалось равномерным („Jahrb. d. Erfindungen“, XVI, стр. 114).

358 АНАЛИЗ ГЛАСНЫХ ЗВУКОВ

гольцу пришлось прибавить еще четыре камертона с тонами d''' , f''' , as''' и b''' . Взяв тогда b в качестве основного тона, он получил гласную A при умеренно-сильном одновременном звучании b' и f''' и сильном звучании b'' и d''' . Для того чтобы звук A перевести в немецкое Ae , следует b' и f''' несколько усилить, b'' ослабить, а d''' и b''' взять возможно сильнее. Для E следует первые два наиболее низкие тона, b и b' взять умеренной силы, а высшие f'' , as'' и b''' взять возможно сильно. Что касается гласной I , то она и с этим набором камертонов еще не могла быть получена¹.

Помимо этого прекрасно удавшегося синтеза, анализ произносимых человеком гласных дал в свою очередь поразительный результат. А именно, Гельмгольц установил, что произносимые ртом гласные звуки образуются не обертонами, находящимися в постоянном отношении к основному тону, а обертонами, абсолютная высота которых не зависит от основного тона. Так, для гласной U характерен составной тон f ; для O — составной тон b' ; для A — b^2 ; для E — тоны b^3 и f ; для I — тоны d^4 и f . Гельмгольц объясняет это тем, что указанные обертоны не являются собственно обертонами звуков, образующихся в гортани, а представляют собой резонансные тоны полостей горла и рта, которые в произнесенном или пропетом звуке усиливают соответствующие им обертоны. А так как эти резонансные тоны полости рта в зависимости от высоты произносимой гласной могут приходиться как на первые, так и на последние ее обертоны, то становится понятным, почему определенные гласные на известные ноты произносятся легче, чем на другие. Хотя в общем, все согласны с приведенными объяснениями Гельмгольца, однако по вопросу об анализе гласных звуков другие исследователи пришли частично к иным, а порою и принципиально отличным результатам; однако ввиду существующего различия в произношении, а также ввиду влияния других побочных обстоятельств это представляется вполне естественным, равно как затруднительным является разрешение вопроса о том, на чьей стороне в данном случае истина. Уже сам Гельмгольц отметил, что измерения характерных для гласных тонов, произведенные до него, не вполне совпадают с результатами его исследований². После Гельмгольца Рудольф Кениг³ исследовал гласные аналогичным способом и тоже пришел к другим результатам, а именно,

¹ „Подобно гласным человеческого голоса, — говорит Гельмгольц, — могут быть воспроизведены и органые тоны различных регистров, если только в них нет слишком высоких побочных тонов; однако в воспроизведенном звуке нет тех шумов, которые дает воздух, рассекаемый губою трубки. Камертоны воспроизводят только музыкальную часть тембра. Для воспроизведения звуков язычковых инструментов недостает резких высоких обертонов; но гнусливый звук кларнета можно воспроизвести с помощью ряда нечетных обертонов; мягкие же звуки рога получаются при одновременном звучании всего хора камертонов”.

² Первая работа Гельмгольца „Über die Klangfarbe der Vocale" появилась в „Pogg. Ann.", CVIII, стр. 280, 1859; незадолго до этого Меркель („Anthropophonik", Leipzig 1857) и более подробно Доидерс („Arch. f. holländ. Beitr. zur Natur- und Heilkunde", 1858) исследовали резонансные тоны рта при произношении отдельных гласных.

³ „Comptes rendus", LXX, стр. 931, 1870. — R. König (1832—1904 г.) — акустик-механик в Париже.

для пяти гласных *U, O, A, E* и *I* он нашел в качестве характерных обертонов пять октав, b, b', b^2, b^3 и b^4 . В правильности этого ряда Кениг усматривает доказательство в пользу своего мнения, а в простоте этого отношения он видит физиологическую причину того, что во всех языках мы встречаем всегда примерно те же пять гласных, хотя человеческий голос способен создать бесконечное количество различных гласных. На основании многочисленных опытов фон-Цан¹ пришел к выводу, что всякий вообще гласный звук характеризуется не одной или двумя постоянными нотами, а гармоническим рядом более или менее далеко друг от друга отстоящих тонов. Наконец, Э. ван-Квантен² оспаривает постоянство характерных тонов в гласных звуках, утверждая, что более низкому основному тону соответствуют и более низкие характерные обертоны, более высокому — более высокие. Феликс Ауэрбах³ попытался занять в этом отношении среднюю позицию, утверждая, что в каждом гласном звуке содержатся два элемента — абсолютный и относительный, а новейшие работы Германа Грассмана⁴, равно как Флеминга Дженкина и Эвинга⁵, указывают на возможность примирения указанных противоположных взглядов на этой основе. Во всяком случае гельмгольцевское объяснение тембра гласных усилением определенных обертонов благодаря резонансу полости рта остается неоспоримым.

Идя дальше в развитии своей темы о тембре тонов, Гельмгольц затем находит, что различия музыкальных тембров зависят только от присутствия и силы составных тонов, но не зависят от разности их фаз; способность же уха разлагать сложные звуки на составные тоны он объясняет анатомическими его особенностями и, прежде всего устройством так называемого кортиева органа. Этим заканчивается глава о природе отдельных звуков, и затем Гельмгольц переходит к исследованию одновременного действия нескольких звуков. При одновременном звучании двух тонов различной высоты получаются эффекты двоякого рода, а именно — биения, или толчки, и комбинационные тоны. Раньше считали, что между этими двумя явлениями существует лишь степенное различие, так что биения, при достаточной частоте, должны ощущаться как комбинационные тоны. Но Гельмгольц показал, что между этими явлениями существует основное различие. Биения представляют собой чисто интерференционное явление. Когда две волны с одинаковым периодом колебаний встречаются в различных фазах, то, в зависимости от различия фаз, они взаимно усиливают или ослабляют друг друга. Такое изменение сохраняется в постоянном виде, и воспринимаемый нами тон остается неизменным. Если же встречаются волны с различными периодами, то они, в зави-

¹ „Osterprogramm der Thomasschule in Leipzig“, 1871, обзор в „Jahrb. d. Erfind.“, VII, стр. 93, 1871. — v. Zahn — профессор математики в Лейпциге.

² „Pogg. Ann.“, CLIV, стр. 272 и 522, 1875.

³ „Pogg. Ann.“, дополнительный том VIII, стр. 177. — F. Auerbach (родился в 1856 г.) — профессор физики в Бреславле.

⁴ „Wied. Ann.“, 1, стр. 608, 1877.

⁵ „Nature“, XVIII, стр. 340, 394, 454, 1878. — Дженкин и Эвинг применяли в своих исследованиях сильно увеличенные кривые, полученные с помощью фонографа.

360 РАЗНОСТНЫЕ И СУММОВЫЕ ТОНА

симости от отношения числа колебаний, периодически то усиливают, то ослабляют друг друга, и наше ухо воспринимает эти усиления и ослабления как толчки или биения. Для этих биений имеет силу закон, установленный уже Гэллстремом ¹. Число биений в определенный промежуток времени равно разности чисел колебаний обоих тонов за то же время. Хотя комбинационные тоны, известные уже с давнего времени, и следуют тому же закону, тем не менее происхождение их все-таки нельзя сводить к биениям. Помимо этого вида комбинационных тонов, которые Гельмгольц, согласно закону Гэллстрема, назвал *разностными* тонами, он нашел еще новый вид комбинационных тонов, названный им *суммовым* тоном, так как число их колебаний равно сумме чисел колебаний тонов, которые их вызывают ². Вообще же *причины* возникновения комбинационных тонов сводятся, по его мнению, к следующему: «До сих пор всегда принимали, что различные звуковые волны, возбужденные в воздухе или в другой упругой среде, просто складываются, не оказывая друг на друга никакого влияния; это допущение считали в достаточной мере доказанным тем фактом, что при одновременном звучании музыкальных инструментов или человеческих голосов мы в состоянии различать в отдельности каждый инструмент или голос со свойственными им высотой и тембром. Но, с другой стороны, следует принять во внимание, что возможность такого простого сложения волн теоретическая механика доказала лишь для *бесконечно малых колебаний*; между тем из уравнений движения воздуха можно усмотреть, что при колебаниях с конечной величиной амплитуд такое простое сложение не может иметь места. Теоретическое исследование случаев последнего рода мне показало, что различные простые колебания упругого тела накладываются беспрепятственно друг на друга до тех пор, пока амплитуды колебаний настолько малы, что вызванные смещениями движущие силы примерно пропорциональны самим смещениям. *Но когда амплитуды колебаний возрастают настолько, что квадраты смещений уже заметно влияют на величину движущих сил, то возникают новые системы простых колебательных движений, периоды которых соответствуют периодам известных комбинационных тонов*» ³. Комбинационные тоны слышны лишь тогда, когда два музыкальных тона различной высоты звучат одновременно *сильно* и равномерно. Но в этом именно случае результирующее движение нельзя, как при интерференции, рассматривать как простую алгебраическую сумму составных движений, — при рассмотрении его следует непосредственно обращаться к действующим силам. Силу, которая при подобных условиях после смещения массы m в упругой

¹ См. стр. 254 первого выпуска настоящей части.

² Работа о *комбинационных тонах* была первой оригинальной работой Гельмгольца по акустике (до тех пор он давал лишь обзоры по акустике в „Fortschr. der Physik“ за 1848 и 1849 гг.). Первое сообщение было им сделано в Берлинской академии наук 22 мая 1856 г.; подробная статья была помещена в „Pogg. Ann.“, XCIX, стр. 497, 1856. Там сказано: „Хотя, таким образом, причины воспринимаемых нами комбинационных тонов, с точки зрения их высоты, могут быть подведены под действие закона Гэллстрема, тем не менее их порядок и условия их возникновения остаются еще под сомнением“ (стр. 500).

³ „Pogg. Ann.“, XCIX, стр. 531—532; „Wiss. Abhandl.“, I, стр. 295

ТЕОРИЯ КОМБИНАЦИОННЫХ ТОНОВ 361

среде на расстояние x стремится вернуть ее в положение равновесия, Гельмгольц принимает равной $ax+bx^2$. Если при этом на одну и ту же точку действуют две системы волн с силами $f\sin(pt)$ ¹ и $g\sin(qt+c)$, то уравнение ее движения приобретает следующий вид:

$$-m \frac{d^2x}{dt^2} = ax + bx^2 + f \sin(pt) + g \sin(qt + c).$$

Это уравнение можно проинтегрировать с помощью ряда, если положить

$$x = \varepsilon x_1 + \varepsilon^2 x_2 + \varepsilon^3 x_3 + \dots,$$

$$f = \varepsilon f_1,$$

$$g = \varepsilon g_1,$$

и затем, после приведения, приравнять поочередно нулю все коэффициенты при различных степенях ε . Тогда получается:

$$ax_1 + m \frac{d^2x_1}{dt^2} = -f_1 \sin(pt) - g_1 \sin(qt + c), \quad (1)$$

$$ax_2 + m \frac{d^2x_2}{dt^2} = -bx_1^2, \quad (2)$$

$$ax_3 + m \frac{d^2x_3}{dt^2} = -2bx_1x_2 \text{ и т. д.} \quad (3)$$

Из уравнения (1) получается путем интегрирования, если положить:

$$\frac{f_1}{mp^2 - a} = u \quad \text{и} \quad \frac{g_1}{mq^2 - a} = v,$$

$$x_1 = A \sin\left(t\sqrt{\frac{a}{m}} + b\right) + u \sin(pt) + v \sin(qt + c).$$

Это — знакомый результат для бесконечно малых колебаний; в нем выражены три тона: собственный тон точки m и оба сообщенных ей тона с числами колебаний p и q . Так как собственный тон быстро затухает, то A можно положить равным нулю; тогда путем подстановки x_1 в уравнении (2) получаем:

$$\begin{aligned} x_2 = & -\frac{b}{2a}(u^2 + v^2) - \frac{u^2}{2(4mp^2 - a)} \cos(2pt) - \\ & - \frac{u^2}{2(4mq^2 - a)} \cos 2(qt + c) + \frac{uv}{m(p - q)^2 - a} \cos[(p - q)t - c] - \\ & - \frac{uv}{m(p + q)^2 - a} \cos[(p + q)t + c]. \end{aligned}$$

¹ Из приведенного на стр. 353 уравнения $y = A \sin(2\pi/T)t$ получается путем дифференцирования совершенно тождественное по форме уравнение для силы колебания.

362 ПРИЧИНА СОЗВУЧИЯ И ДИССОНАНСА

Таким образом, второй член ряда для x содержит, кроме одной постоянной величины, тоны с числами колебаний $2p$, $2q$, $(p-q)$ и $(p+q)$, т. е. первые обертоны p и q , а также первый разностный и первый суммовой тоны тех же тонов. Амплитуды этих комбинационных тонов пропорциональны произведению uv , и, следовательно, при малых амплитудах первичных тонов они представляют собою малые величины второго порядка и возрастают с амплитудами первичных тонов в отношении квадратов. Отсюда понятно, почему при слабых первичных тонах комбинационные тоны не слышны и почему суммовой тон всегда слабее разностного. Путем разложения высших членов x_3 , x_4 и т. д. можно дальше аналогичным образом получить высшие обертоны, а также комбинационные тоны высших порядков¹.

Построив, таким образом, теорию комбинационных тонов на новых основаниях и совершенно отделив их от биений, Гельмгольц в соответствии с этим показал, что последние ощущаются нами как толчки, даже и в том случае, когда их частота далеко перешагнула через нижнюю границу нашего звукового восприятия. Правда, когда их частота становится больше чем 39 в секунду, толчки уже не воспринимаются каждый в отдельности, но их действие проявляется в том, что звук становится неровным, дребезжащим, шероховатым. Интересно, что граница восприятия биений зависит не только от их числа, но также и от соответствующих интервалов тона. Так, например, полутон в верхней октаве дает еще ясные биения, тогда как малая терция в нижней октаве их не дает, несмотря на то, что в первом случае биения следуют друг за другом гораздо чаще, чем во втором. Гельмгольц объясняет это явление тем обстоятельством, что биения бывают слышны лишь в том случае, когда возбужденные концы нервов в кортиевоом органе лежат близко друг от друга, т. е. когда соответствующий интервал тонов не превышает известного предела².

Быстрые биения дают возможность еще глубже проникнуть в особенности наших звуковых ощущений. Всякое прерывистое раздражение наших нервных аппаратов возбуждает их сильнее, чем длительное равномерное раздражение. Подобно тому как мерцающее пламя уто-

¹ „Tonempfindungen“, 4 изд., стр. 650.

² Открытие суммовых тонов Гельмгольцем было экспериментально подтверждено в 1876 г. Рудольфом Кенигом. Он воспроизводил суммовые тоны (дабы исключить возможность объяснения их разностными тонами высшего порядка между обертонами) при помощи камертонов, дававших почти чистые тоны. Только в одном пункте, по его мнению, теория Гельмгольца требует поправки. А именно, с помощью своих изолированных камертонов с возможно простыми тонами он показал, что при относительно малой частоте биения действительно сообщают тону известную шероховатость; однако с увеличением частоты биения, по его мнению, переходят в тоны и, больше того, в виде тонов ощущаются вообще всякие прерывы, например колебания в силе, если только они были достаточно часты („Pogg. Ann.“, CLVII, стр. 177, 1876). Гельмгольц не согласился с мнением Кенига; тем не менее последний продолжал настаивать на своей точке зрения и в 1881 г. („Wied. Ann.“, XII, стр. 335) в новой большой работе пытался доказать ее правильность. Позднее, в 1885 г., Роберт Вебер вновь подтвердил законы Гельмгольца о разностных и суммовых тонах при помощи устроенного им аппарата, который он назвал электрической сиреной („Wied. Ann.“, XXIV, стр. 671, 1885).

ВОЛНОВЫЕ МАШИНЫ 363

мляет и раздражает глаз, так и интервалы, вызываемые быстрыми биениями, неприятны для уха. *Поэтому подобные интервалы, образующие спутанную массу тонов, трудно разложимую на элементы, ощущаются нами как диссонансы, тогда как интервалы, тоны которых следуют друг за другом равно, без биений, дают ощущение созвучия.* Ввиду специально физического характера настоящего сочинения и за недостатком места мы не можем здесь входить в описание того, каким образом Гельмгольц дальше на основании биений между первичными тонами, между обертонами и комбинационными тонами устанавливает условия созвучия и *аккорда* и затем на этой базе строит основные законы *гармонии*. Однако уже из приведенного можно видеть, какое большое значение имеет работа Гельмгольца и для физики в тесном смысле. Гельмгольц блестяще показал на примере и, пожалуй, более ясно и сознательно, чем когда-либо раньше до него, *каким образом физика может свести особенности наших ощущений, их различия по силе и по качеству, к движениям или к изменениям движений и, таким образом, сделать величины ощущений доступными даже для математической обработки.*

В этом отношении сочинение Гельмгольца, которое, вообще говоря, как будто стоит в стороне от общего русла новейшей физики, вплотную приближается к осуществлению ее цели, заключающейся в том, чтобы свести все явления природы к движениям. Что касается того обстоятельства, что в конце своего труда Гельмгольц ставит себе как натуралисту известную границу и исключает из своей задачи все, что относится к *музыкальной эстетике*, поскольку в этой области действуют психические моменты, — то здесь он дает пример научной сдержанности, который можно смело рекомендовать многим психологам и философам.

Результаты усиленного внимания, оказанного Гельмгольцем сложению музыкальных тонов, а вместе с тем и сложению колебаний и волновых движений, скоро проявились в быстром конструировании и усовершенствовании приборов, предназначенных для *разложения сложных звуков*, причем, идя навстречу требованиям времени, при этом стремились также и к *объективному наглядному изображению* этих явлений. Прежде, когда речь шла, главным образом, о том, чтобы облегчить понимание волнообразного движения, строились приборы, показывавшие наглядно процессы колебания и распространения волн, а также их сложение. Так, И. Г. Мюллер в 1846 г. применял стробоскопический диск, или «колесо жизни», для демонстрирования колебательных и волновых движений с помощью специально для этой цели нарисованных шаблонов¹. Около того же времени Уитстон построил волновую машину, открывшую собою серию приборов, в которых ряд иголок или маятников с блестящими головками принимал форму определенной волны путем перемещения под ними или путем наложения на них моделей волн. Из чисто последних особенно был известен усовершенствованный прибор Фесселя; после этого подобные машины, с различными усовершен-

¹ „Pogg. Ann.“, LXVII, стр. 271.1846.—Joh. Heinrich Jac. Müller (1809—1875)— профессор физики во Фрейбурге (Баден).

364 ФОНОСКОПЫ И ФОНОГРАФЫ

ствованиями для наглядного изображения или даже для создания новых комбинаций волн, продолжали конструироваться вплоть до новейшего времени ¹. Но наряду с устройством подобных волновых моделей усердно занялись устройством и таких приборов, которые давали бы возможность непосредственно наблюдать отдельные колебания и их составные элементы, достигая при этом возможно большей точности. С целью изучения колебаний струн Томас Юнг ² обматывал их серебряной нитью и рассматривал в темной комнате, направляя на избранную точку струны сильный пучок света. По существу аналогичный метод применил в 1855 г. Лиссажу ³ для наблюдения сложения колебаний и для сравнения этим путем колебаний исследуемого тела с нормальными колебаниями другого тела. С этой целью он снабжал оба колеблющихся тела, обыкновенно два камертона, колебания которых он хотел сложить или сравнить, двумя маленькими зеркальцами и затем направлял сильный пучок света таким образом, что, упав на одно из зеркалец, он отражался от другого, а затем падал на экран. Обыкновенно Лиссажу устанавливал колеблющиеся тела таким образом, что плоскости их колебаний были перпендикулярны друг к другу; тогда при колебаниях в унисон на экране получался светлый эллипс, а при других соотношениях тонов получались более сложные фигуры, которые получили название фигур Лиссажу. Для более точного, хотя и субъективного наблюдения этих фигур он заменял зеркальце на сравниваемом теле объективом маленькой зрительной трубки; луч, отраженный от первого вибрирующего тела, проходил через этот колеблющийся объектив, а затем через неподвижный окуляр попадал в глаз наблюдателя. Гельмгольц при своих исследованиях применил такой же прибор в не-

¹ Фессель узнал от Плюкера об устройстве машины Уитстона („Pogg. Ann.“, LXXVIII, стр. 421, 1851). Форономическая волновая машина Маха (Carl's Repert. f. Experimentalphysik, VI, стр. 8, 1871) служит для демонстрирования распространяющихся стоячих волн как поперечных, так и продольных. Мельде устроил прибор („Pogg. Ann.“, юбил. том, стр. 101, 1874) для получения волновых поверхностей. Пфаундлер очень остроумно приспособил старый прибор с иглами для сложения любого числа волнообразных линий, лежащих в одной и той же плоскости („Tageblatt der 60 Naturforscherversammlung“, стр. 82, Wiesbaden 1887).

² „Outlines of exp. and inquiries resp. sound and light“, „Phil. Trans.“, 1800 перепечатано в „Lect. on natur. phil.“, II, 1807. Согласно утверждению Писко („Die neueren Apparate der Akustik“, стр. 116, Wien 1865) Ф. Г. фон-Буссе и Хладни производили подобные наблюдения еще до Юнга.

³ „Comptes rendus“, XLI, стр. 93, 814 и др., подробно в „Ann. de chim. et de phys.“ (3), LI, стр. 147, 1857. Калейдофон (состоявший из упругих палочек, укрепленных одним концом неподвижно и снабженных блестящими сферическими пуговками на других свободных концах), описанный Уитстоном в 1827 г., был устроен по принципу Юнга, но с научной точки зрения не имел большого значения. Лишь в 1862 г. Мельде превратил его в универсальный калейдофон, с помощью которого можно очень удобно показывать сложение любых взаимно перпендикулярных колебаний. В этой конструкции он состоит из упругой, на одном конце неподвижно укрепленной пластинки, к другому концу которой прикрепляется меньшая пластинка таким образом, чтобы плоскость ее была перпендикулярна к плоскости первой. Последняя пластинка может перемещаться с помощью скобы и на верхнем конце имеет блестящую пуговку („Pogg. Ann.“, CXV, стр. 118, 1862). — Jul. Ant. Lissajous (1822—1880) — профессор физики в Париже.

ФОНОСКОПЫ И ФОНОГРАФЫ 365

сколько измененном виде в качестве *вибрационного микроскопа*. Лиссажу использовал свой прибор для подробного изучения сложения колебаний и тонов, а главным образом для проведения порученной ему во Франции проверки нормальных камертонов, для которых в 1859 г. там было установлено нормальное a в 870 (половинных) колебаний¹. Для наблюдения *воздушных колебаний пуховых инструментов* и для настройки их, конечно, нельзя непосредственно применить метод Лиссажу; для этой цели следует сообщить эти колебания сначала каким-нибудь твердым телам, лучше всего *тонким перепонкам*. Подобным приемом впервые воспользовался в 1859 г. Э. Скотт; однако он совершенно отказался от световых фигур Лиссажу и предпочел регистрировать колебания перепонки прямо при помощи присоединенного к ней *пишущего штифта*. Правда, этот *графический* метод не был придуман самим Скоттом, его уже раньше неоднократно применяли в различных видах. В 1830 г.² В. Вебер наносил колебания камертона на закопченное стекло, слегка проводя по последнему камертоном, к одной из ножек которого было прикреплено упругое острие. Дюгамель установил упругие острия, прикрепленные к колеблющимся струнам и прутьям, таким образом, что они слегка касались закопченной поверхности цилиндра, который приводился во вращение рукояткой около оси с винтовой нарезкой³. Количество гребней и впадин звуковых волн, получавшееся при этой записи, давало абсолютное число колебаний за соответствующий промежуток времени. Конечно, и обратно, если наперед известно число колебаний тела в секунду, можно по числу вычерченных на барабане колебаний определить величину соответствующего промежутка времени. Таким образом, графические виброскопы можно было применить в качестве хроноскопов и это именно обстоятельство сильно содействовало их усовершенствованию. Вертгейм⁴ применил при своих исследованиях метод Дюгамеля но, найдя, что вращение цилиндра недостаточно равномерно, а следовательно, и измерение времени недостаточно точно, он присоединил к прибору *нормальный пишущий камертон*, дававший 256 колебаний в секунду. При помощи этого

¹ По Лиссажу („Cosmos", VI, стр. 598, 1855). Совер принял для тона a 810 колебаний; Делезенн (1808 г.) — 853 — 880; по Шейблеру a Парижской оперы имело в 1834 г. 867,5, a консерватории — 870 колебаний; но в 1855 г. a Парижской оперы давало 898, Лилльской оперы — даже 901 колебание. Законом 16 февраля 1859 г. было установлено нормальное a для Франции в 870 колебаний.

² „Schilling's musikalisches Lexikon", т. I, статья В. Вебера „Akustik", Stuttgart 1830; по Писко, „Die neueren Apparate der Akustik", стр. 238.

³ „Comptes rendus", XI, стр. 15, 1840; „Pogg. Ann.", LVII, стр. 392. Дюгамель отмечает, что уже Уатт и позднее Эйтельвейн записывали таким образом движения и что он сам придумал этот способ уже 15 лет назад. Писко („Die neueren Apparate", стр. 238) утверждает, что в College de France среди старых приборов имеется подобный цилиндр для записывания, с которым работал при своих опытах Савар, и высказывает предположение, что идея этих приборов принадлежала Савару. Однако, как видно из сказанного выше, это предположение мало вероятно.

⁴ „Comptes rendus", XV, стр. 112, 1842; „Pogg. Ann.", LVII, стр. 382; в статье „Recherches sur l'élasticité et la tenacité des métaux".

366 ХРОНОГРАФЫ

усовершенствованного прибора он, по его словам, получил возможность измерять время с точностью до $\frac{1}{2560}$ сек.¹

Однако мысль о превращении виброскопов в приборы для измерения времени стала планомерно проводиться лишь позднее, и идея *хроноскопии* получила толчок совсем с другой стороны. Пуллье в 1844 г. попытался наладить измерение очень малых промежутков времени следующим образом: он допустил, что при *очень кратковременном замыкании тока* отклонение стрелки гальванометра пропорционально продолжительности тока, и по показаниям гальванометра судил о длительности тока. В том же году Брегэ² описал другую форму хроноскопа, который он разработал совместно с русским артиллерийским офицером Константиновым. На цилиндр, равномерно вращающийся около горизонтальной оси, в начале и конце движения опускались при помощи электрического тока металлические штифты, которые и отмечали соответствующие моменты времени. Статья Брегэ вызвала возражение со стороны Уитстона³, который, заявляя о своем первенстве в этом изобретении, указал, что такого типа приборы он послал в 1840 г. Брюссельской академии наук, а в 1842 и 1843 гг. — Константинову. Различие между этими приборами заключалось, по его словам, лишь в следующем: Уитстон заметил, что штифты падают на цилиндр не в надлежащие моменты, поэтому он оставил свою первоначальную идею и устроил прибор таким образом, что штифт писал на цилиндре, вращающемся около оси с винтовой нарезкой, сплошную спиральную линию, которая в нужные моменты прерывалась⁴. Вернер Сименс⁵ вместо штифта воспользовался для отметок *электрическими искрами*, которые перескакивали на цилиндр и не влияли на равномерность его хода. Но так как в дальнейшем выяснилось, что и часовой механизм, которым был снабжен цилиндр, не обеспечивает достаточно равномерного хода аппарата в течение продолжительного времени, то Гипп в 1848 г.⁶ усовершенствовал уитстоновский хроноскоп, устроив таким образом, что часовой механизм каждую секунду спускал на цилиндр второй штифт, который делал там отметку; таким образом, нормальный промежуток времени, с которым надлежало сравнивать измеряемые отрезки времени, был ограничен одной секундой. После этого перешли к тому, что на цилиндре наряду с началом и концом изучаемого явления стали регистрировать еще значительно меньшие промежутки времени; для этой

¹ „Comptes rendus“, XIX, стр. 1384, 1844; „Pogg. Ann.“, LXIV, стр. 452. По Поггендорфу („Pogg. Ann.“, LXIV, стр. 466) до Пуллье подобные же методы измерения времени применяли Морен, Дюпрэ и др. Якоби заявил, что приоритет в данном изобретении принадлежит ему, а не Пуллье (см. также Fortschr. der Physik im Jahre 1845“, I, стр. 46).

² „Note sur un appareil destiné à mesurer la vitesse d'un projectile“, Comptes rendus“, XX, стр. 157, 1845; „Pogg. Ann.“, LXIV, стр. 459. — Louis François Clément Breguet (1804—1883), внук знаменитого часовщика А. Л. Брегэ и его преемник по фирме, член академии и Бюро долгот в Париже.

³ „Comptes rendus“, XX, стр. 1554, 1845; „Pogg. Ann.“, LXV, стр. 451.

⁴ Сам Уитстон приписывает идею этого прибора Томасу Юнгу, высказавшему ее в его „Lectures on nat. phil.“

⁵ „Pogg. Ann.“, LXVI, стр. 435, 1845.

⁶ Там же, LXXIV, стр. 589, 1848.

ФОНАВТОГРАФ 367

цели на цилиндре стали наноситься одновременно колебания нормального камертона. На этом именно принципе устроили свои *хроноскопы* Лаборд¹, В. Беетц², И. Г. Мюллер³ и особенно удачно Р. Кениг⁴. На первых порах *измерительный камертон* приводился в движение просто смычком, но затем Беетц стал для этой цели применять электромагнитную установку Гельмгольца, при которой он мог получать колебания любой продолжительности. С этой же целью Кениг в приборах более простого устройства применял кроме пишущего камертона еще второй камертон с равным числом колебаний; последний он приводил в движение с помощью смычка, а благодаря резонансу приходил в колебание и пишущий камертон; эта установка давала более равномерные колебания пишущего камертона. Начало и конец определенного промежутка времени по-прежнему отмечались при помощи искры или при помощи автоматически падающих штифтов с острями.

И упомянутый выше *пластинчатый фонограф Скотта*⁵, или *фонавтограф*, как его называл сам Скотт, тоже получил в это время большое значение, правда, не столько сам по себе, сколько благодаря приборам, которые были построены на том же принципе. Фонавтограф состоял из полого гипсового сосуда эллипсоидальной формы, в одном фокусе которого помещалось звучащее тело, а в другом находилась мембрана, воспринимающая звуковые колебания. Прикрепленный к наружной поверхности последнего небольшой штифт записывал колебания перепонки на вращающемся цилиндре. Кениг усовершенствовал этот прибор только в том отношении, что он придал воспринимающему сосуду параболическую форму, а в качестве материала для сосуда взял цинк; новый очень интересный метод наблюдения воздушных колебаний с помощью мембран он применил при устройстве своих известных *манометрических пламен*. Манометрическое пламя получалось при горении газа, вытекающего из сосуда, одна стенка которого состояла из упругой перепонки; когда на эту перепонку падали звуковые колебания, это вызывало соответствующие колебания пламени. Кениг сначала ставил манометрическое пламя в узлах звучащих органнх трубок для того, чтобы сделать видимыми происходящие там попеременно сгущения и разрежения воздуха⁶; но затем он соединил его с воспринимающей частью фонавтографа для того, чтобы с помощью манометрического пламени изучить различные звуковые колебания⁷. *Вращающиеся зеркала*, примененные Кенигом для наблюдения колебаний пламени, принадлежит по своей идее Уитстону⁸, который уже в 1834 г.

¹ „Cosmos“, XVII, стр. 48 и 156, 1860.

² „Pogg. Ann.“, CXXXV, стр. 128, 1868.

³ Там же, CXXXVI, стр. 151, 1869.

⁴ Акустические приборы Кенига возбудили большой интерес на всемирных выставках в Лондоне (1862 г.) и Париже (1867 г.); они описаны в его „Catalogue des appareils d'acoustique“, Paris 1865. См. также F. I. Pisco, „Die neueren Apparate der Akustik“, Wien 1865.

⁵ „Cosmos“, XIV, стр. 314, 1859.

⁶ „Cosmos“, XXI, стр. 147, 1862; „Pogg. Ann.“, CXXII, стр. 242.

⁷ Акустический каталог, 1865; ср. Pisco, „Die neueren Apparate der Akustik“, стр. 197 и далее.

⁸ „Phil. Trans.“, стр. 583, 1834.

368 МАНОМЕТРИЧЕСКОЕ ПЛАМЯ

при своих работах по измерению скорости электричества *производил при помощи таких зеркал анализ движения пламени*; позднее с этой же целью Тиндаль ¹ применил трехгранную призму с зеркальными сторонами, которая, будучи подвешена на нити, вращалась вследствие раскручивания этой нити. *Манометрическое пламя Кенига* представлялось сначала по сравнению с фонавтографом скорее интересной физической игрушкой, чем научным измерительным прибором, однако очень скоро оно стало применяться с большим успехом для изучения гласных звуков, хотя этот метод и оказался не вполне надежным, фон-Цан ² при своих упомянутых выше исследованиях нашел, что для анализа высших гласных звуков изображения этих пламен могут *дать лишь немного*, и высказал мысль, что этот пробел может быть восполнен фотографированием этих изображений, благодаря чему и представится возможность спокойно производить количественные измерения. Ауэрбах ³ при изучении гласных, помимо манометрического пламени применил еще два других способа и получил, таким образом, возможность выяснить их сравнительные достоинства. Сначала он считал способ Кенига, ввиду объективности и четкости даваемых им изображений, наилучшим, но затем убедился, что изменчивость давления газа, вращение зеркала и в особенности свойства перепонки, передающей колебания, заметно влияют на форму пламени. После этого он стал применять для этой цели резонаторы, покрывая отверстие их узкого конца, вставляемого обычно в ухо, мыльной пластинкой и наблюдая колебания последней по старому методу Лиссажу с помощью световых зайчиков ⁴. И все-таки, в конце концов, обычный субъективный анализ звуков на слух при помощи резонаторов пришлось признать наиболее надежным. Однако позднее Г. Грассман ⁶ указал, что и резонаторы изменяют первоначальное соотношение сил отдельных тонов, и признал недостаточным все вообще искусственные средства для анализа гласных звуков.

В еще более непосредственной связи с фонавтографом, чем регистрация пламенем, находятся *фонограф Эдисона и телефон* — аппараты, которые, конечно, могли бы быть и прямо сконструированы, исходя из устройства нашего слухового органа, и, вероятно, в конечном счете, построены на этом принципе. О телефоне у нас будет речь ниже; об *эдисоновском же фонографе* мы здесь заметим только, что он впервые был описан 22 декабря 1871 г. в «Scientific American», XXXVII,

¹ „Philosophical Magazine" (4), XIII, стр. 473.

² „Jahrb. d. Erfindung.", VII, стр. 93 1871.

³ „Pogg. Ann.", дополнительный том VIII, стр. 177.

⁴ Около этого же времени Фр. Мельде исследовал поперечные колебания жидких пленок и установил для них следующий закон. При равных площадях пленок, края которых имеют форму правильных многоугольников, числа колебаний их тем меньше, чем больше сторон в многоугольнике. Кроме того, из небольшого числа опытов, по-видимому, вытекало, что у различных жидкостей числа колебаний относятся между собой, как корни квадратные из их поверхностных натяжений („Pogg. Ann.", CLIX, стр. 275, 1876; в его „Akustik", стр. 131, Leipzig 1884; здесь, однако, Мельде не упоминает о втором законе). — Fr. E. Melde (родился в 1832 г.) — профессор физики в Марбурге.

⁵ „Wied. Ann.", I, стр. 606, 1877.

ФОНОГРАФ ЭДИСОНА 369

стр. 384 и 11 марта 1878 г. был продемонстрирован (впервые на нашем континенте) перед Парижской академией наук. Хотя по существу он представляет собою не что иное, как фоноавтограф Скотта, приспособленный для использования его в обратном направлении, однако для осуществления этого аппарата потребовались, период времени в 20 лет и работа первоклассного изобретательского гения.

Аппараты, в которых колебания воздуха передаются перепонкам и, обратно, распространяются последними, до известной степени разрешили старый спор о *колебаниях упругих пластинок*. Савар¹ утверждал, что перепонка способна воспринимать *любые* тоны, высота которых выше собственного ее тона, и с этой точки зрения объяснял функции нашей *барабанной перепонки* в процессе восприятия звука. Однако Пуассон² и Ламе³ теоретически, а Ж. Бургэ и Ф. Бернар⁴ также и экспериментальным путем пришли к иным выводам. В 1862 г. Радо⁵ снова высказался в пользу прежнего мнения, согласно которому упругие пластинки могут воспроизводить лишь *отдельные* свойственные им, в соответствии с их величиной, массой и т. п., основные тоны и обертоны.

Однако приведенные выше аппараты вполне определенно показали, что при известных условиях перепонки способны воспроизводить любые тоны, хотя они и изменяют тембры и свойства тонов. В соответствии с этим взглядом Эльзас⁶ прямо показал, что всякое упругое тело при надлежащем воздействии может давать любой вид колебаний, но только, в зависимости от расстояния между вынужденным тоном и тоном собственного колебания тела, воздействие на тело должно быть более или менее сильным и интенсивность самого вынужденного колебания бывает больше или меньше.

Газовое пламя оказалось чувствительным к воздушным колебаниям еще и в другом, более свободном виде, чем в виде манометрического пламени Кенига. Шаффготш в 1857 г.⁷ открыл в загадочной *химической гармонике* новые удивительные свойства и этим значительно оживил интерес к данному явлению. А именно, он заметил, что если поблизости от пламени химической гармоники возбуждается музыкальный тон, который звучит (приблизительно) в унисон с тоном гармоник или на октаву выше, то пламя приходит в возбуждение, сильно колеблется вверх и вниз, а при достаточной силе внешнего звука даже гаснет. При высоких собственных тонах гармоник сильные фальцетные ноты человеческого голоса заставляли ее умолкнуть на расстоянии в 10—12 шагов; того же можно было достичь хлопаньем в ладоши и другими шумами; а сильный органный тон действовал на пламя, уси-

¹ „Ann. de chim. et de phys." (2), XXXII, стр. 384, 1823.

² „Mém. de l'acad.", VIII, стр. 510, 1829.

³ „Leçons s. l'élasticité", стр. 131, 1852.

⁴ „Ann. de chim. et de phys." (3), X, стр. 449, 1860.

⁵ „Cosmos", XX, стр. 658 и XXI, стр. 533, 1862.

⁶ „Wied. Ann.", XIX, стр. 174, 1883. — А. Elsas (родился в 1855 г.) — доцент в Марбурге.

⁷ „Pogg. Ann.", C, стр. 352, 1857; CI, стр. 471, 1857. — Franz. G. J. J. C. Graf Schaffgotsch (1816—1864), Берлин.

370 ХИМИЧЕСКАЯ ГАРМОНИКА

ливая или туша его, даже на расстоянии в 44 м¹. После этого Тиндаль на опытах с сиреной установил зависимость данного явления от высоты внешнего тона и собственного тона пламени². Когда тон сирены постепенно приближался к тону пламени, начиная с более низких нот, то пламя колебалось все медленнее и медленнее и, наконец, колебания его прекращались, когда оба тона сравнивались; при дальнейшем повышении внешнего тона колебания снова постепенно учащались и, наконец, становились незаметными. Таким образом, пламя своими движениями оптически воспроизводило акустические биения обоих тонов. При известной высоте трубки пламя звучало всего легче; ниже и выше этого места его можно было по желанию заставить петь или замолкнуть, причем оно не гасло. Десять лет спустя Тиндаль³ исследовал новое явление *чувствительного пламени*, которое подметил его ассистент Баретт⁴ и которое находится в несомненной связи с поющим пламенем. А именно, когда зажженный газ находится под столь сильным давлением, что пламя близко к вспышке, то оно приходит в сильное колебание и начинает то укорачиваться, то удлиняться, лишь только поблизости от него раздается тон надлежащей высоты. Эти процессы можно рассматривать как явления резонанса, и, действительно, Планету⁵ удалось показать, что эти пламена, подобно резонаторам, способны усиливать звуки камертонов.

Тем не менее, способность пламени приходить в колебание до сих пор еще не объяснена, и общей теории колебания пламени пока еще не существует или, по крайней мере, не существует еще общепризнанной теории. Более *старая* гипотеза, подкрепленная авторитетом Фарадея, заключающаяся в том, что звучание пламени происходит вследствие прерывистости горения, как будто еще в 1866 г.⁶ была подтверждена наблюдениями слоистости поющего пламени. Однако уже в 1858 г. Грайлих и Вейсс⁷ объяснили данное явление более естественно не периодическим потуханием пламени, а изменениями объема, происходящими при горении газа, притоком кислорода, удалением продуктов горения и поднятием по трубке нагретого воздуха. В пользу последнего

¹ Последние опыты были произведены в Гамбурге в большой церкви св. Михаила; сильный мужской голос при созвучии действовал на пламя еще на расстоянии в 36 м.

² „Philosophical Magazine" (4), XIII, стр. 473, 1857.

³ „Philosophical Magazine" (4), XXXIII, стр. 92 и 375, 1867: „On sounding and sensitive flames" и „On the action of sounding vibrations on gaseous and liquid jets." Последняя работа посвящена также рассмотрению того явления, что тоны изменяют и структуру вытекающих из отверстий водяных и газовых струй.

⁴ Баретт отметил, что, пользуясь чувствительным пламенем, можно с помощью электрического звонка передавать на расстояние крик младенца. Влияние тонов на пламя было, по-видимому, неоднократно замечено и раньше; во всяком случае, в 1858 г. ле-Конт указал на пульсирование так называемого пламени „рыбьего хвоста" под влиянием биений музыкальных тонов („Silliman's Journ." (2), XXV, стр. 62), о чем в указанной выше работе упоминает и Тиндаль.

⁵ „Pogg. Ann.", CXLIV, стр. 639, 1871.

⁶ Там же, CXXVIII, стр. 347, 1866.

⁷ „Sitzungsber. d. Wien. Akad.", XXIX, стр. 271. — W. J. Grailich (1829—1859) — приват-доцент в Вене. — E. Weiss (родился в 1837 г.) — профессор Венского университета.

обстоятельства особенно сильно говорили опыты П. Л. Рийке¹, который вызывал звучание в трубках без всякого пламени, накаливая в них электрическим током металлические сетки. Зондгаус² в 1860 г. вывел из своих опытов заключение, что причина данного явления заключается в *колебаниях самого воздуха в вытечной трубке*; он указал при этом на звуки, возникающие при вытекании воды³, и сравнил этот процесс с возникновением тонов в языковых трубках. И. Б. Цох⁴, пытаясь хотя бы частично отстоять гипотезу Фарадея, указал, что верхушка пламени периодически то тухнет, то загорается. А. Терквем⁵ объяснил звучание трубки *взаимодействием между пламенем и вызываемым им восходящим током воздуха*; этот ток изменяет форму пламени, а последнее в свою очередь действует на ток воздуха, так что вся система начинает совершать правильные колебания. Наконец, Брезина⁶ объяснил данное явление тем, что входящий в трубку воздух под пламенем *замедляется*, вследствие чего в этом месте образуется *сгущение*, которое, выравниваясь в обе стороны, вызывает колебания. Возможно, что многие или даже все приведенные причины влияют на звучание пламени, однако новейшие работы над родственными явлениями заставляют нас в большей мере, чем раньше, предполагать, что звуки пламени, подобно всем вообще звукам, возникающим при движении воздушных масс, происходят вследствие *сопротивления*, которое встречает газ, протекая мимо другого газа, или мимо твердых тел, — что они, следовательно, должны быть отнесены к разряду *звуков от трения*. Другими словами, поступающий в трубку воздушный ток приходит в колебания вследствие трения о края и стенки трубки, равно как о пламя и, в случае соответствия этих колебаний собственному тону трубки, они приобретают характер регулярного звука. Подобного рода объяснения были уже предложены в 60-х годах Гиндалем и Кундтом, а последний⁷, в частности, показал, что подобные звуки от трения можно воспроизвести и на свободном пламени. Привлеченный случайным звучанием: широких пламен светильного газа, Кундт путем наблюдения установил, что два встречных тока воздуха, вытекающих из тонких заостренных трубок, дают легкие тоны, когда струи неодинаково интенсивны или же когда они направлены не прямо друг против друга, а несколько в сторону. Направленные таким же образом струи горящего светильного газа издавали более сильные звуки. Однако подобные тоны возникали и в том случае, когда одно из этих пламен заменялось струей атмосферного воздуха или угольной кислоты, и — что представлялось убедительнее всего — они были слышны и тогда, когда пламя направляли и просто на стену.

¹ „Pogg. Ann.“, CVII, стр. 339, 1859.— P. L. Rijke (родился в 1812 г.) — профессор Лейденского университета.

² „Pogg. Ann.“, CIX, стр. 1 и 426, 1860.— K. Fr. I. Sondhauss (1815—1886) — директор реальной гимназии в Нейссе.

³ „Pogg. Ann.“, CXXIV, стр. 1 и 235, 1865.

⁴ Там же, CXXVII, стр. 589, 1866.

⁵ Там же, CXXXIV, стр. 468, 1868.

⁶ „Programm d. Archigymnasiums Soest 1880—1881“; „Beiblätter zu Wied. Ann.“, V, стр. 401. — Bresina — проректор этой гимназии.

⁷ „Pogg. Ann.“, CXXVIII, стр. 614, 1866.

372 ЗВУКИ ОТ ТРЕНИЯ; ТОНЫ ОТ ЩЕЛИ

Многочисленные, вызывавшие большой интерес работы о трении газов и жидкостей друг о друга, а также о твердые тела, естественно повлекли за собою дальнейшие исследования о *звуках от трения*. Во всех случаях, когда газ или жидкость движется мимо твердых тел или же, наоборот, твердые тела движутся в газах или жидкостях, должны, как при трении друг о друга твердых упругих тел, возникать шумы, и последние могут перейти в тоны, если движения достаточно правильны или если вблизи имеется тело, которое способно выделить эти тоны из шума путем резонанса¹. Первую большую работу о подобных тонах от трения опубликовал в 1878 г. В. Стругаль². Он укрепил на вертикальной оси друг над другом два передвижных горизонтальных плеча, между которыми можно было натягивать тела, исследуемые с точки зрения звуков от трения (металлические проволоки, стеклянные палочки, стеклянные трубки), и затем при помощи махового колеса приводил рукою ось в быстрое вращение. Эти опыты привели его к следующим законам: высота тона от трения не зависит ни от вещества, ни от степени натяжения, ни от длины проволоки; она прямо пропорциональна скорости ее движения и обратно пропорциональна ее толщине; с увеличением длины проволоки возрастает и сила звука. Если у тонких упругих проволок движение постепенно ускорять, то сила тона несколько раз нарастает до значительных максимумов, причем это случается всякий раз, когда тон от трения совпадает с собственным тоном (основным или обертоном) проволоки. Значит, при достаточной силе воздействия сама проволока приходит в звучание, когда колебания воздуха, вызванные трением, соответствуют ее тону. Однако тот факт, что при увеличении вращательной скорости тон от трения по своей высоте опережает тон продолжающей еще звучать струны, ясно свидетельствует о том, что тоны от трения существуют самостоятельно. Отсюда, конечно, следовало, что звуки *оловой арфы* являются тонами от трения, или тонами струн, вызванными трением. Точно так же и звуки *губных трубок* Стругаль объясняет трением воздушного тока о губу инструмента. К этому мнению присоединился в своей «Акустике» 1883 г.³ и Мельде, который дальнейшими опытами тоже установил зависимость тонов губных трубок от тонов трения. Изменяя различным образом давление, а, следовательно, и скорость, с которой воздух входит в трубку, он пришел к следующему закону: в органной трубке может зазвучать обертон, когда он становится обертоном по отношению к тону от трения, получаемому от вдувания в трубку воздуха; сила тона данной трубки повышается тем

¹ Тоны всех смычковых инструментов являются, конечно, *тонами от трения*.

² „Wied. Ann.“, V, стр. 216, 1878.

³ „Akustik“, стр. 72 и 249, Leipzig, 1883. Мельде, однако, не считает возможным принимать выражение „тоны от трения“ в его прямом смысле. О возникновении тонов Стругалья он говорит („Akustik“, стр. 72) следующее: „Здесь следует, наверное, допустить возникновение уплотнений и разрежений воздуха, в особенности в связи со своеобразными их вихревыми движениями. Следовательно, когда применяют выражение „тоны от трения“, то следует иметь в виду, что оно ближайшим образом не выясняет сущности и действительного процесса возникновения тона“.

ЗВУКИ ОТ ТРЕНИЯ; ТОНЫ ОТ ЩЕЛИ 373

больше, чем больше этот тон является тоном сильнейшего резонанса, т. е., когда последний звучит в унисон с тоном от трения¹. Тоны поющего волчка Мельде тоже объясняет тонами от трения, возникающими в отверстии волчка и усиливаемыми резонансом его полости².

Но, во всяком случае, в губных инструментах следует различать тоны от трения *двоякого* происхождения: одни, соответствующие стругалевским тонам, возникающие на губе, и другие, возникающие на краях воздушной щели. Последние внимательно исследовал В. Кольрауш в 1881 г.³. При этом он пришел к выводам, вполне соответствующим положениям Стругаля, и на этом основании признал доказанным, что *тоны от щели*, подобно стругалевским тонам, возникают вследствие трения движущихся масс воздуха о соответствующие твердые тела или же о слои воздуха, приставшего к твердым телам. Аналогичным образом Э. Сорель⁴ объясняет замеченные путешественниками в пустынных местах звуки наполовину струнного, наполовину колокольного характера. Он полагает, что эти звуки представляют собою тоны от трения воздушных токов о выступы скал или гребни гор, усиливаемые долинами, как резонаторами.

Хотя в физике уже давно проводилась усиленная работа над общими вопросами о превращении сил, тем не менее, акустика вплоть до новейшего времени оставалась в стороне от этого общего движения. Но теперь, когда было выявлено так много разнообразных случаев превращения механических движений в звуковые колебания, обратились, наконец, и к проблеме о превращении звуков в иные формы движения. Э. Варбург⁵ пришел к выводу, что при звучании твердых тел некоторая часть звуковой энергии всегда превращается в теплоту и тем большая, чем скорее прекращается звучание. Подобное нагревание установили сначала при продольных колебаниях твердых тел, а затем и при поперечных; однако в хорошо высушенных газах (атмосферном воздухе, угольной кислоте и светильном газе) не было замечено какого-либо образования теплоты. В 1872 г. Шампион и Пелле⁶ нашли, что при благоприятных условиях звук может освобождать химические силы; так, например, йодистый азот взрывается при наличии определенных высоких тонов. Артур Христиани в 1882 г.⁷ показал, что в некоторых случаях резонаторы способны поглотить тоны, не издавая звуков, а непосредственное превращение звуковых движений в электричество в телефоне Белла представило с этой точки зрения особый интерес.

Отсюда сама собою возникла мысль об измерении звуковой энергии, об отношении между силой звука и теми силами, которые его вызывают; разработка *сонометрии* стала насущной задачей физики. Однако для оценки сравнительной интенсивности различных тонов звука ухо еще

¹ „Akustik“, стр. 254, Leipzig, 1883.

² Там же, стр. 255.

³ „Wied. Ann.“, XIII, стр. 545, 1881.

⁴ „La Nature“, стр. 206, 1883.

⁵ „Pogg. Ann.“, CXXXVII, стр. 632, 1869.

⁶ „Klein's Revue“, стр. 435, 1875.

⁷ Там же, стр. 196, 1884.

374 ЭНЕРГИЯ ЗВУКА

менее пригодно, чем глаз для оценки света; *поэтому устройство сонометров не только заставило ждать себя дольше, но и до сих пор оно удалось в значительно меньшей степени, чем устройство фотометров.* Правда, физиологи многократно занимались определением чувствительности уха к различиям в интенсивности звука, то при этом измерялась собственно не сила звука, а величина живой силы, примененной для получения звука¹. Прибор для объективного *сравнения сил звуков* попытался устроить А. М. Майер². Звуки из двух источников, находившихся в отдельных комнатах, он воспринимал одинаково настроенными резонаторами и затем по трубкам одинаковой длины направлял в манометрическую капсулу кениговского прибора. Спокойное состояние манометрического пламени указывало на равенство сил обоих звуков, воспринимаемых резонаторами, а по расстоянию последних от источников звуков исчислялась, по закону убывания силы звука пропорционально квадратам расстояний, — сила звуковых источников³. В. Дворак⁴ в 1877 г. указал, что и с помощью изобретенных им приборов для демонстрации акустических притяжений и отталкиваний можно было бы измерять энергию звуковых движений, а, следовательно, и интенсивность звуков. Наконец, А. Обербек⁵, вспомнив замечание В. Вебера, сделанное им в 1846 г.⁶, что силу звуковых движений можно было бы измерять вызываемыми ими при некоторых условиях *индукционными токами*, воспользовался им следующим образом. Введя в цепь гальванического тока *микрофон* и гальванометр, он наблюдал колебания стрелки, вызываемые звуками, действовавшими на микрофон, принимая их в известных пределах пропорциональными силам звуков; к сожалению, при этом выяснилось, что микрофон неодинаково чувствителен к различным звукам. Обербек применил свой прибор, главным образом, для выяснения того, какая доля энергии, сообщаемой звучащему телу, действительно превращается в звуковое движение. Для силы звука, вызываемого падением свинцовых или каменных шаров на деревянную доску, он принял эмпирическую формулу $J = p \cdot h^\varepsilon$, где p обозначает вес падающего тела, h — высоту падения, а ε — некоторую постоянную величину. Наблюдая затем отношение сил звуков при падении некоторого тела с различных высот, он получил из приведенной формулы для ε значения, колебавшиеся между 0,629 и 0,656. Раньше него Фирордт⁷ определил для различных шаров высоты падения, при которых по субъективной оценке ухом получались звуки одинаковой силы; из этих опытов для ε определилось число 0,622.

¹ Эти исследования были вызваны преимущественно основным психофизическим законом Фехнера.

² „Philosophical Magazine" (4), XLV, стр. 90, 1873.— Alfred 'M. Mayer — профессор физики Stevens-Institut в Hoboken (Северная Америка).

³ По Фирордту („Zeitschr. f. Biologie", XVIII, стр. 383; „Jahrb. der Erfind.", XIX, стр. 140) отклонения от этого закона очень незначительны; ослабление звука при его распространении почти пропорционально расстоянию.

⁴ „Wied. Ann.", III, стр. 328, 1877.

⁵ Там же, XIII, стр. 222, 1881. — А. Oberbeck (родился в 1846 г.) — профессор физики в Грейфсвальде.

⁶ „Elektrodyn. Maasbest.", I, стр. 297.

⁷ „Zeitschr. f. Biologie", XIV, стр. 300, 1873.

Обербек полагает, что возможность применения микрофона в качестве сонометра выяснится только в результате дальнейшей разработки, но указывает, что по своей чувствительности микрофон, во всяком случае, значительно превосходит все аппараты, применявшиеся до сих пор для изучения звука.

Новая кинетическая теория газов вызвала некоторую тревогу в области теории распространения звуков в газах. Едва только в начале шестидесятых годов, наконец, пришли к единогласию по вопросу о поправке Лапласа к формуле Ньютона, как все привычные дедукции снова были поставлены под знак вопроса механической теорией газов. Раньше распространение звука представляли себе, как передачу движения в покоящейся среде; теперь же колебания должны были передаваться от частицы к частице, причем все они сами по себе уже обладали значительными скоростями; поэтому на движения отдельных молекул в газе, проводящем звук, уже нельзя было смотреть исключительно как на звуковые колебания. Но, с другой стороны, нетрудно было сообразить, что в среде, в которой происходят внутренние движения, сгущения и разрежения должны распространяться, как в покоящейся среде. Так, например, если в газе колеблется какая-нибудь плоскость, то при своем движении вперед она будет отражать от себя ударяющиеся об нее молекулы с большею скоростью, чем та, какую они имели в момент удара. Эту увеличенную скорость молекулы при своих столкновениях будут передавать другим молекулам, и эта передача, равно как и уплотнение, вызванное увеличенной скоростью, будет распространяться по всему газу. То же самое будет происходить и с разрежением при попятном движении упомянутой плоскости. Таким образом, все различие в распространении звука по старой и новой теориям будет заключаться лишь в том, что в первой предполагается передача всей скорости, а во второй *передача разности скоростей*. При этом, однако, остается одно значительное затруднение. Так как передача разностей скоростей происходит благодаря движению газовых частиц, то можно было бы думать, что скорость этой передачи, а значит, и *скорость распространения звука должны быть равны скорости движения молекул соответствующего газа*, а между тем это, как известно, не соответствует действительности. И. Стефан, первый высказавшийся в литературе о распространении звука с точки зрения новой теории газов, указал на это затруднение уже в 1863 г.¹ По-видимому, — говорит он, — до сих пор никто не обратил внимания на то обстоятельство, что если допустить в газах правильное расположение молекул, как его представлял себе Крениг, то из новой теории газов можно получить для скорости распространения звука ньютоновскую формулу. По этой теории скорость звука должна зависеть от скорости поступательного движения молекул и обе скорости были бы почти равны, если бы скорости всех молекул имели направление, одинаковое с направлением распространения звука². Но если мы представим себе, по Кренигу, пространство разделенным на кубики, в каждом из кото-

¹ „Pogg. Ann.“, CXVIII, стр. 494, 1863.

² Там же.

376 ИЗМЕРЕНИЯ РЕНЬО

рых движутся параллельно сторонам кубика только три молекулы, и то же пространство разделенным еще на слои плоскостями, перпендикулярными к диагональным осям кубиков, то движение от слоя к слою будет распространяться лишь со скоростью $x=u/\sqrt{3}$, где u обозначает поступательную скорость молекул. Если, далее, мы обозначим через m массу одной молекулы, через v — определенный объем, через n — число молекул в этом объеме и через p — существующее давление, то, по Кренигу и Клаузиусу, $pv=mnv^2/3$. Отсюда, если mn/v , т. е. плотность газа, обозначить через ρ , мы получим формулу Ньютона: $x=\sqrt{p/\rho}$.

Однако этот вывод скорости распространения звука на основе новой теории газов, остававшийся долгое время без изменения, не мог дольше остаться в силе после того, как Клаузиус, Клерк, Максвелл, О. Е. Мейер и Руше отказались от простоты крениговских допущений и даже допустили неравенство скоростей молекул в одном и том же газе. Поэтому Гоорвег¹ попытался построить вывод скорости распространения звука на самых общих основаниях кинетической теории газов, но, в отличие от Стефана, замедление звука по сравнению со скоростью молекул он объяснил *потерей времени*, испытываемой молекулами при их столкновениях. Тольвер Престон² при разработке того же вопроса вернулся, наоборот, к точке зрения Стефана на причину замедления скорости. Вопрос об отношении скорости звука к скорости молекул получил тем больший интерес, что отношение это для всех газов, или, по крайней мере, для газов одинакового молекулярного строения³, должно было оставаться приблизительно постоянным и величина его могла послужить для определения скорости звука по скорости движения молекул, и обратно. По Стефану величина этого отношения $x/u=1/\sqrt{3}=0,577$. Гоорвег дал для него число 0,649, а Максвелл в связи с работой Престона вывел для него число 0,745. Эти числа, действительно, могли бы послужить хорошей проверкой для соответствующих теорий, если бы только скорость молекул и скорость распространения звука были более точно известны.

Можно смело утверждать, что в течение последних столетий измерения распространения скорости звука никогда не прекращались, и, тем не менее, никогда еще не удалось прийти к достаточно точным и надежным результатам. В 1868 г. Реньо⁴ снова произвел длинный ряд *измерений скорости звука* и получил очень точные числа, но вместе

¹ „Archives neerlandaises“, XI, стр. 131, 1876; реферат, составленный при участии автора, помещен в „Beiblätter zu Wied. Ann.“, 1, стр. 209.

² „Philosophical Magazine“ (5), III, стр. 441, 1877.

³ Если допустить, что молекулы не являются твердыми телами, то на проведение звука должны влиять и *интрамолекулярные движения*, и притом различно в молекулах с различным числом атомов.

⁴ „Mém. sur la Vitesse de propagation des ondes dans les milieux gazeux“ „Mém. de l'Inst.“, XXXVII, стр. 3—575, 1868.

МЕТОД КУНДТА 377

с тем он получил такие результаты, которых нельзя было безоговорочно принять. Для этих опытов Реньо использовал длинные газо- и водопроводные трубы; на одном конце трубы звук вызывался пистолетным выстрелом, а на противоположном конце приход звуковых волн отмечался колебанием каучуковой мембраны, натянутой на отверстии трубы. При многих опытах входное отверстие тоже закрывалось каучуковой пластинкой тотчас же после выстрела, и тогда нередко наблюдалось отражение звука до десяти раз. Время, какое требовалось для прохождения звука по трубе вперед и назад, определялось с помощью камертонного хронографа Кенига. Опыты дали ожидаемые результаты, *что скорость распространения звука не зависит от давления, что в различных газах она изменяется соответственно корню квадратному из плотности*; но вместе с тем они дали и *неожиданный* результат, что *скорость возрастает с силой звука*. Для средней скорости распространения звука в сухом воздухе при 0° , исчисленной с момента выстрела и до того момента, когда сила звука настолько уже ослабела, что звук перестает влиять на самую чувствительную мембрану, Реньо получил число 330,6 м. В двух сериях опытов на открытом воздухе, где звук производился пушечными выстрелами с расстояний в 1280 и 5445 м, определились скорости в 331,37 и 330,7 м, откуда Реньо снова сделал заключение об уменьшении скорости звука с уменьшением его силы ¹. Благодаря этим опытам, из которых определилось число, значительно отклоняющееся от выводов прежних измерений, дававших в большинстве случаев число, близкое к 332 м, вопрос о скорости звука опять стал проблематичным ².

А. Кундт, который в 1866 г. ³ открыл новый способ демонстрирования звуков с помощью *пыльных фигур* и применял его для определения скорости звука, использовал теперь этот косвенный метод для проверки результатов, полученных Реньо ⁴. Если приводить в сильное звучание воздух в стеклянных трубках, закрытых с одного конца подвижным

¹ Приход звуковых волн у Реньо всегда выявлялся по движению легких перепонок. Возможно, что при этой установке сильные звуки действовали на перепонку быстрее, чем слабые, поэтому указанный результат получился, быть может, не вследствие меньшей скорости более слабого звука, а вследствие более поздней его регистрации. Тем не менее, возможно, что очень сильные сотрясения воздуха, вызывающие очень сильные сгущения, распространяются быстрее, чем вполне установившиеся правильные воздушные волны. С. Ирншоу пришел к подобным выводам уже в 1858 г.; Мах („Wien. Ber.", LXXV, стр. 101) тоже наблюдал повышенные скорости волн при взрывах.

² Ле-Ру приводит („Ann. de chim. et de phys." (4), XII, стр. 354) следующую сводку результатов по измерению скорости распространения звука:

1738 Парижская академия наук	332	м
1811 Бенценберг	{ 337,70	"
	{ 332,33	"
1821 Гольдингэм	331,10	"
1822 Бюро долгот	330,64	"
1822 Моль и фан-Бек	332,25	"
1822 Шгампфер и Мирбах	332,44	"
1844 Браве и Мартэн	332,44	"

³ „Pogg. Ann.", CXXVII, стр. 497, 1866.

⁴ Там же, CXXXV, стр. 337 и 527, 1868.

378 МЕТОД БОСША

поршнем, то в них благодаря отражению образуются стоячие волны, заставляющие расположиться легкий порошок, насыпанный в трубке, правильными кольцами или полосами. Эти пыльные фигуры выявляют *узловые линии* стоячих колебаний и дают, таким образом, возможность точно измерить *длину волны*, с помощью которой, после установления высоты тона или числа колебаний данного звука, обычным образом можно вычислить *скорость распространения звука*. Устроив прибор, который давал возможность наполнять трубку различными газами, и, устранив всякое влияние на нее внешних колебаний воздуха, Кундт при помощи этого прибора пришел к следующим выводам: 1) скорость звука в воздухе в трубках уменьшается с диаметром последних и начинает заметно отличаться от скорости его на открытом воздухе, когда диаметр трубки становится меньше $\frac{1}{4}$ длины волны тона, примененного при опыте; 2) в узких трубках при шероховатости внутренней их поверхности скорость звука уменьшается; 3) *влияние силы звука, равно как и способа его получения, не может быть доказано*, если только отвлечься от скорости первой волны; 4) в широких трубках скорость звука не зависит от давления, а в узких — при повышении давления скорость увеличивается; 5) *все наблюдаемые изменения скорости происходят вследствие трения и, в особенности вследствие теплового обмена на стенках трубки*. При 100° скорость звука равна $v_0\sqrt{1+100\alpha}$, где v_0 представляет собою скорость при 0° , а α — коэффициент расширения воздуха. Эти данные Кундта, даже там, где они расходятся с результатами Реньо, хорошо согласуются с полученными около того же времени теоретическими выводами Кирхгофа ¹. Определенное расхождение между последними и экспериментальными результатами Кундта имеется только по вопросу о влиянии диаметра трубок, но их Кундт объясняет частью ошибками наблюдения, частью влиянием примененного порошка на движение в трубках.

При измерении скорости звука на открытом воздухе на точность результатов вредно влияло изменчивое состояние атмосферы, а при измерениях в трубках — влияние самих трубок. Отсюда явилась потребность произвести измерение скорости звука на небольших расстояниях в возможно закрытых помещениях. Соответствующий метод, так называемый метод совпадения звуков, предложил уже в 1854 г. И. Босша ². Если в цепь гальванического тока ввести два электромагнитных звонка и наладить их таким образом, чтобы в то время, когда они стоят вплотную рядом, их удары происходили одновременно, и если затем с одним из этих звонков удаляться от другого, то их звучание будет снова слышно одновременно лишь в том случае, когда звук будет

¹ „Pogg. Ann.“, CXXXIV, стр. 177, 1868; также „Gesammelte Abhandlungen“, стр. 540, 1882. Кирхгоф дает формулу: скорость в трубке равна скорости на

$$\times \left(1 - \frac{\gamma}{2r\sqrt{\pi n}}\right)$$

открытом воздухе, где γ обозначает постоянную, зависящую от трения и от теплового обмена. Совершенно такую же формулу, но только с иным значением "постоянной γ ", дал в 1863 г. Гельмгольц („Verhandl. d. naturhist.-med. Vereins zu Heidelberg“, III, стр. 16, 1863; „Wissensch. Abhandl.“, 1, стр. 381).

² „Pogg. Ann.“, XCII, стр. 485, 1854.

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА 379

проходить расстояние, разделяющее оба колокольчика, как раз за промежуток времени, протекающий между двумя или несколькими ударами. Отсюда по данным о расстояниях, проходимых звуками за определенное время, уже легко вычислить скорость их распространения даже в пределах комнаты, если последняя достаточно велика. В 1862 г. Кениг¹ устроил прибор для практического осуществления этого метода, однако для совершенно точных измерений он оказался непригодным. Наконец, в 1877 г. Амос Чатмари² получил несколько видоизмененным методом для скорости звука в сухом воздухе при 0° число 331,57 м.

В 1874 г. Тиндаль³ опубликовал интересные наблюдения о совершенно различном распространении звука в воздухе в различных направлениях. Он нашел, что *акустическая прозрачность* совершенно не зависит от оптической, и приписал акустическую непрозрачность, главным образом, содержащемуся в воздухе водяному пару или смеси его с воздухом. Около того же времени Осборн Рейнольдс пришел к выводу⁴, что туман также ослабляет звук, и объяснил это явление трением колеблющегося воздуха о менее подвижные и, следовательно, относительно покойные частицы воды. Генри и Дюан⁵ на основании своих опытов пришли к заключению, что распространению звука всего больше препятствуют *различия температур* и вызываемые ими воздушные токи и изменения плотностей. В полном согласии с этим последним мнением В. Жэкс⁶ полагал, что причина акустических недостатков многих больших аудиторий заключается не только в их пространственных соотношениях, но также в *неблагоприятных воздушных течениях*, вызываемых особыми местными температурными условиями, и подтвердил свое мнение интересными опытами.

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА (приблизительно от 1860 до 1880 г.). В течение последнего периода *электричество* получило поразительное развитие в двух направлениях. Начав с малого, с нескольких своеобразных явлений, совершенно выходящих за пределы действия остальных физических сил, электричество в своем развитии не только постепенно приблизилось к последним, но из всех физических сил оказалось наиболее способным к превращениям и, таким образом, сделалось главной опорой идеи о единстве всех сил природы. Это привело в новейшее время, с одной стороны, к попытке теоретически проделать обратный путь и *свести электричество к единой основе, общей со всеми прочими физическими силами*, а с другой стороны; — вызвало стремление *осуществить и в технике все необходимые превращения и передачи сил при посредстве электричества*. Конечно, в обоих этих направлениях указанный процесс ни в коем случае еще нельзя

¹ „Comptes rendus“, LV, стр. 603, 1862; „Pogg. Ann.“, CXVIII, стр. 610, 1863.

² „Wied. Ann.“, II, стр. 418, 1877.

³ „Pogg. Ann.“, юбил. том, стр. 668, 1874. Здесь Тиндаль говорит (стр. 681): „Не дождь, не град, не сырость, не туман, не снег и вообще не вода в какой-либо жидкой или твердой форме, а газообразная вода в смеси с воздухом делает последний акустически мутным и облачным“.

⁴ „Nature“, XII, стр. 373, 1875.

⁵ „Silliman's Journal“ (3), XI, стр. 34, 1876.

⁶ „Philosophical Magazine“ (5), VII, стр. III, 1879.

380 ТЕОРИЯ ГЕЛЬМГОЛЬЦА

считать законченным. Нельзя еще сказать, чтобы было доказано полное соответствие между электричеством и прочими физическими силами с точки зрения их сущности и характера действия; еще меньше можно утверждать, что электричество действительно уже осуществило в технике указанную выше роль посредника, — но в обоих этих направлениях цель вполне ясно поставлена и возможность ее окончательного достижения едва ли кем оспаривается.

Что касается общих воззрений на *характер действия* электрических сил, то для них, конечно, приходилось брать в качестве исходной точки наиболее общий и основной закон этого действия, закон Вебера, или же, по крайней мере, согласовать их с последним. В предыдущем отделе мы уже отметили, что в тот период всякая принципиальная оппозиция против этого закона прекратилась и исследования ставили себе целью лишь проверку соответствия выводов, сделанных из него по отношению к гальванической индукции, с прочими предложенными в то время теориями тех же явлений, причем результаты этих исследований оказались, во всяком случае, не неблагоприятными для закона Вебера. Идя тем же путем, Гельмгольц теперь, однако, пришел к иным результатам и этим вызвал новую общую дискуссию по поводу данного закона.

По словам самого Гельмгольца ¹ в 1870 г. ему пришлось в связи с некоторыми опытами обсудить вопрос, каким образом электрические токи начинают течь внутри телесных проводников, и за решением этого вопроса он обратился к теории. Уравнения движения электрических токов переменной силы для проводников трех измерений, следующие из веберовского закона электрического действия на расстоянии, были выведены в 1857 г. ² Кирхгофом и частью им, частью другими математиками были с успехом применены для объяснения некоторых экспериментальных явлений. При попытке же Гельмгольца применить их к указанной новой проблеме теория привела его к физически недопустимым выводам, и он убедился, что причина этого заключается в самих принципах этой теории. А именно, *согласно выводам из теории Вебера равновесие покоящегося электричества в проводящем теле может быть неустойчивым и поэтому построенная на этом теория допускает возможность таких электрических токов, у которых сила и плотность непрерывно возрастают и могут достигнуть бесконечно больших значений*. Наоборот, уравнения движения, выведенные Гельмгольцем на основе неймановского закона индукции, дали для покоящегося электричества устойчивое равновесие и, следовательно, не привели к вышеуказанным невозможным выводам. Для того чтобы сделать выбор между существовавшими в то время теориями индукции Вебера, Неймана и Клерка Максвелла, Гельмгольц вывел общее выражение для *потенциала двух элементов тока*, которое заключало в себе все установленные до того времени законы. Это выражение содержало в себе неопределенной величины постоянную k , которая должна была принимать значения, равные

¹ „Journ. f. reine und angew. Math.“, LXXII, стр. 57, 1870; .Wissensch. Abhandl.“, 1, стр. 545:

² „Über die Bewegungsgleichungen der Elektrizität für ruhende leitende Körper“.

² „Pogg. Ann.“, CII, стр. 529, 1857.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ КОНВЕКЦИЯ 381

соответственно 1,0 и —1, когда общее выражение Гельмгольца должно было переходить в выражения, данные Нейманом, Максвеллом и Вебером. Дальнейшее исследование электрических движений показало, что при отрицательном значении постоянной k возможно и отрицательное значение *работы*, представленной электрическим движением, т. е. возможна величина меньшая, чем при состоянии покоя; таким образом, возможность неустойчивого равновесия в состоянии покоя допускалась одной лишь теорией Вебера. Поэтому, признавая, что закон Вебера находится в соответствии с законом сохранения силы постольку, поскольку он не допускает кругового процесса, который создавал бы работу из ничего, Гельмголец ¹ все же пришел к выводу, что первый закон противоречит второму в том отношении, что согласно закону Вебера две электрические частицы, начавшие свое движение с конечною скоростью, приобретают на конечном друг от друга расстоянии бесконечно большую живую силу и, следовательно, могут произвести бесконечно большую работу. На это возражение В. Вебер в 1871 г. ² ответил замечанием, что довод Гельмгольца справедлив лишь при том условии, *если электрическим массам приписать начальную скорость, значительно большую скорости распространения света, и если сверх того принять, что электрические массы могут сблизиться друг с другом на молекулярные, т. е. бесконечно малые, расстояния*. Однако Гельмголец ³ продолжал стоять на своем, утверждая, что указанные им отношения могут сложиться согласно закону Вебера и при *практически осуществимых условиях*. Это разногласие дало повод к довольно продолжительным дискуссиям, в которых приняли участие и другие ученые, как, например, Нейман, Целльнер, Ж. Бертран, Рике и т. д., большею частью стоявшие на стороне Вебера; в результате этих дискуссий появилось несколько ценных работ на эту тему, которые, однако, не смогли разрешить данного спорного вопроса на физико-математической основе. Но и на *экспериментальной основе* разрешение указанного расхождения между этими теориями представлялось тогда едва ли возможным. Сам Гельмголец указал, что по отношению к круговым процессам закон Вебера не дает отклонений и что вообще для замкнутых токов все три указанных закона индукции в одинаковой мере соответствуют фактической стороне дела. Для *незамкнутых же токов*, или для *концов тока*, исследование встречало покуда непреодолимые препятствия, вызванные преимущественно продолжительностью токов, длящейся только в течение того времени, пока подводится количество электричества, необходимое для заряжения поверхности соответствующего проводника ⁴. Наконец, Гельмголец решил, что имеется возможность получать достаточно активные концы тока с помощью *электрической конвекции* — так назвал он перенос электричества, осуществляемый путем переме-

¹ В своей работе о сохранении силы Гельмголец исходил из допущения, что под действие закона о сохранении силы подпадают только те силы, которые зависят от расстояний, но не от скоростей масс (см. выше стр. 42—43).

² „Abhandl. d. K. Sachs. Ges. d. Wiss.“, X, стр. 170, 1871.

³ „Journ. für reine und angew. Math.“, LXXV, стр. 35, 1873; „Wissensch. Abhandl.“, I, стр. 647.

⁴ „Pogg. Ann.“, CLVIII, стр. 91.

382 ГИПОТЕЗА К. НЕЙМАНА

ния наэлектризованных тел. Дело в том, что закон *потенциала* (Неймана-Гельмгольца) приписывает электродинамическое действие только электричеству, движущемуся в весомах массах, но не тому электричеству, которое перемещается конвективно, между тем как закон Вебера не делает между ними в этом отношении никакого различия. Однако опыты, произведенные Н. Шиллером в 1874 г.¹, сначала в физической лаборатории Берлинского, а затем с усовершенствованными приборами в лаборатории Московского университета, привели, по меньшей мере, к следующему выводу: либо действий концов тока, следующих из закона потенциала, вообще не существует; либо помимо электродинамических действий, предуказанных на основе этого закона, существуют еще и аналогичные действия конвективного электричества; таким образом, закон потенциала, во всяком случае, оказывается неполным, если в нем принимают в расчет только действие на расстоянии электричеств, протекающих по проводникам². Произведенные вскоре за тем в той же Берлинской лаборатории исследования Генри А. Роуланда³ прямо показали, что движение наэлектризованных весомах масс действительно производит электромагнитное действие. На этом основании Гельмгольц признал, что *результаты этих опытов, действительно, вполне соответствуют предпосылкам теории Вебера, но при этом отметил, что их можно вывести и из теории Максвелла, отрицающей какое-либо непосредственное действие на расстоянии, а также из закона потенциала, если только при последнем принять во внимание диэлектрическую поляризацию изоляторов, окружающих проводник*⁴.

Хотя, таким образом, правильность закона Вебера с количественной стороны не была оспорена, но уже приведенный только что отзыв Гельмгольца указывает на то, что теперь речь шла уже не столько о правильности выводов, вытекающих из этого закона, сколько о *принципиальной допустимости его исходных предпосылок*, что теперь критика была направлена вообще против возможности и необходимости, во-первых, *непосредственного действия* электрических сил на расстоянии и, во-вторых, *одновременного течения двух противоположных жидкостей по одному проводнику*. К. Нейман в 1871 г.⁵ попытался обойти, по крайней мере, допущение существования двух противоположных токов в одном проводнике. Сохранив в силе основной веберовский закон электрических сил, он вывел законы электродинамического действия и индукции на основе допущения, что только одно из электричеств, положительное, находится в движении, тогда как другое, отрицательное, остается неразрывно связанным с весомой массой. Клаузиус тоже был против допущения Вебера, что при гальваническом токе в каждом элементе проводника должны одновременно перемещаться в противо-

¹ „Pogg. Ann.“, стр. 93; ..Wissensch. Abhandl.“, I, стр. 780; см. также „Pogg. Ann.“, CLIV, стр. 456 и 537; CLX, стр. 333.

² „Pogg. Ann.“, CLVIII, стр. 95.

³ Там же, стр. 487; „Wissensch. Abhandl.“, I, стр. 791. — Н. А. Rowland — профессор физики John Hopkins University в Балтиморе.

⁴ „Pogg. Ann.“, CLVIII, стр. 493.

⁵ „Berichte der K. Sachs. Ges. d. Wissensch.“, XXIII, math.-naturw. Classe, стр. 386, 1871.

ЗАКОН КЛАУЗИУСА 383

ложных направлениях и с одинаковыми скоростями равные количества положительного и отрицательного электричества. «Пока не существует, — говорит он, — неопровержимых доводов в пользу допущения подобного двойного тока, не следует отказываться от более простого представления, что ток является течением одной только жидкости, и на основе этого представления следует попытаться объяснить действия гальванического тока»¹. Но так как закон Вебера казался ему несовместимым с этим простым представлением², то он сам попытался *построить новый основной закон электродинамического действия* двух движущихся частиц электричества³. При этом он считал необходимым *отказаться* и от другого положения Вебера, согласно которому силы притяжения и отталкивания двух электрических элементов должны действовать по линии, соединяющей эти элементы. Для случая тяготения двух весомых покоящихся частиц он принял подобное направление взаимодействия как само собою разумеющееся, так как в данном случае иного определенного направления, кроме соединяющей их линии, не существует; но для двух частиц электричества, находящихся в движении, дело обстоит совершенно иначе. В данном случае кроме прямой, соединяющей обе частицы, есть еще и другие определенные направления, а именно — направления движений самих частиц, и есть все основания думать, что и эти направления влияют на направление силы их взаимодействия. Таким образом, из всех основ веберовской теории Клаузиус оставляет в силе лишь допущение, *что взаимодействие двух электрических частиц зависит от их положения и от состояния движения, обусловленного их скоростями и ускорениями*. На этой основе и с помощью только опытных фактов Клаузиус выводит для электродинамического взаимодействия новый *потенциал* $V=k(ee'vv'/r)\cos\varepsilon$ или вообще для потенциала двух электрических масс e и e' друг по отношению к другу $V=(ee'/r)(1+kvv'\cos\varepsilon)$, где, однако, v и v' обозначают уже не *относительные*, а *абсолютные* скорости частиц и ε — угол между направлениями их движения⁴. Однако и закон Клаузиуса вызвал ряд *возражений* и привлек на свою сторону лишь мало последователей. Сам Вебер был склонен признать его лишь постольку, поскольку он совпадал с его собственным законом. Г. Лорберг⁵, по-видимому, вполне правильно, признал *совершенно неприемлемой вытекающую из формулы Клаузиуса зависимость действий от абсолютных скоростей электрических*, признавая возможной зависимость этих действий только от относительной их

¹ „Die mechanische Behandlung der Elektrizität“, стр. 228, Braunschweig 1879.

² Там же, стр. 232.

³ „Journ. für reine und angew. Math.“, LXXXII, стр. 85, 1876; „Die mechanische Behandlung der Elektrizität“, стр. 225.

⁴ „Die mech. Behandl. d. Elektrizität“, стр. 227. Конечно, и здесь не может быть речи об абсолютной скорости в строгом смысле этого слова. Клаузиус определенно указал („Wied. Ann.“, X, стр. 616, 1880), что, применяя слово абсолютный, он представлял себе среду, в которой движутся электрические частицы, находящейся в покое и что под абсолютной скоростью он, естественно, подразумевал только скорость электрических частиц по отношению к этой среде.

⁵ „Pogg. Ann.“, дополнительный том VIII, стр. 599, 1877.

384 ЗАКОН КЛАУЗИУСА

скорости. «A priori, — говорит он, — конечно, нельзя отвергать допущения, что между двумя электрическими частицами может возникнуть сила не только в результате относительного их движения, но и в результате абсолютного движения их по отношению, скажем, к окружающему эфиру; но тогда, конечно, сила только кажущимся образом исходила бы из электрических частиц, и закон, поскольку он совершенно не учитывает истинного действия внешних сил, представлял бы собою нечто неудовлетворительное»¹. Он пытается затем обосновать это действие, не делая никаких определенных допущений о движении электричества в токе, и снова приходит к тому выводу, что как пондеромоторная, так и электродвижущая силы двух элементов тока вполне соответствуют основному закону Вебера и что поэтому должно быть допущено существование противоположных движений двух электричеств в токе². Клаузиус признает ценность исследования Лорберга для выяснения данной проблемы, но продолжает настаивать на правильности своего закона и характеризует создавшееся положение следующими словами³: *«Если исходить из предположения, что только относительное движение в веберовском смысле этого слова может влиять на электродинамические силы, то приходишь к выводу, что основной закон Вебера является единственно возможным и что в гальваническом токе должны течь два электричества в противоположных направлениях и с равными скоростями. Если же не желают прибегать к допущению, что в гальванических, а равно и в других электрических токах, относительно которых имеют силу электродинамические законы, оба электричества движутся с равными скоростями в противоположных направлениях, то нельзя и допускать, что на электродинамические силы влияет только относительное движение (все равно, в веберовском или же в обычном смысле этого слова), а следует приписать такое влияние и абсолютным движениям; в этом случае мы приходим к моему основному закону как к единственно возможному»*⁴.

¹ „Pogg. Ann.“, дополнительный том VIII, стр. 599—600.

² Там же, стр. 607, 1877.

³ „Die mechanische Behandl. d. Elektrizität“, стр. 352, Braunschweig 1879.

⁴ На основании опытов Вильг. Гинтля [(1804—1883), директор австрийского телеграфного управления] по одновременной передаче депеш в противоположных направлениях по телеграфным проводам между Веной и Прагой в июле 1853 г., которые, впрочем, еще не вполне удались, неоднократно высказывали ту мысль, что уже самая возможность подобных опытов указывает на возможность одновременных и противоположных токов в проводе. Однако Вернер Сименс тотчас же отметил („Pogg. Ann.“, XCVIII, стр. 121), что при этом оставляют без внимания закон Ома и учение о разветвлении тока, и указал на тот факт, что две равные батареи, включенные в цепь в противоположных направлениях, не производят никакого действия; это ясно видно из того, что в этом случае в цепи не развивается никакой теплоты и в батареях не происходит никакого химического действия.— Неожиданно резкую критику, хотя и без всякого обоснования, встретил закон Вебера в „Учебнике теоретической физики“ Томсона и Тэта („Handbuch der theoretischen Physik“, I, стр. 350, Braunschweig 1871). „Он (Вебер) принимает, что электрический ток состоит из движения двух разнородных частиц электричеств, которые пробегают по проводу в противоположных направлениях, и что эти частицы, находясь в относительном движении, развивают по отношению к другим подобным частицам силы, отличные от тех, которые они проявили бы, если бы они находились в состоянии отно-

ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДЕЙСТВИЙ ОТ ВРЕМЕНИ 385

В данном вопросе исследователи действительно продолжали бы оставаться между Сциллой и Харибдой, если бы они не использовали указанного Лорбергом *выхода* и не допустили *участия окружающей среды* в процессе взаимодействия двух электрических частиц. Но последнее, в конечном счете, приводит к пути, уже намеченному Гельмгольцем, принявшим в расчет диэлектрическую поляризацию, а именно, к отказу *от действия на расстоянии* (*actio in distans*), по крайней мере, в области электричества, и к допущению *передачи электрических действий при посредстве диэлектрика*. Однако раньше чем говорить об относящихся сюда работах, примыкающих к воззрениям Фарадея, нам следует остановиться еще на некотором среднем пути. *Если действие силы происходит при посредстве среды, то оно требует для своего распределения известного времени*. Отсюда возникает вопрос, можно ли при определении действия силы ввести в расчет время ее распространения, совершенно отвлекаясь от посредствующей *среды*, природа и движения которой *нам неизвестны*. Первым, который подобным образом ввел в расчет время распространения электрических сил, был, по-видимому, Гаусс. Уже в 1847 г.¹ в одном из своих писем к В. Веберу он сообщает, что давно размышляет над вопросами электродинамики и что он опубликовал бы свои исследования, если бы ему удалось включить в свою работу действительное завершение электродинамики, а именно, вывод добавочных сил (присоединяющихся к взаимодействию покоящихся частиц электричества, когда последние находятся в относительном движении) и их действий, но не мгновенных, а *требующих для своего распространения времени* (аналогично тому, как при свете). Он высказал при этом твердое убеждение в том, что наиболее существенное в данной проблеме — это составить себе определенное представление о *характере распространения этих действий*. Позднее, в 1858 г., Б. Риман представил Геттингенскому научному обществу работу, которая была опубликована лишь после его смерти в 1867 г., так как он взял ее назад². В этой работе Риман выразил электрический потенциал V двух электрических частиц друг относительно друга с помощью формулы, составленной по образцу уравнения Лапласа-Пуассона:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial t^2} - \alpha^2 \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right) + \alpha^2 \cdot 4\pi\rho = 0;$$

здесь α представляет собою определенную скорость (именно $\alpha^2 = 1/2c^2$, где c есть упомянутая раньше постоянная Вебера). Риман не сделал

сительного покоя. Такое допущение при настоящем состоянии науки никак не может быть оправдано, так как гипотезу о существовании двух электрических жидкостей отнюдь нельзя считать правильной и так как, кроме того, эти выводы находятся в противоречии с началом „сохранения энергии“, которое мы на основании бесчисленного количества экспериментальных данных признаем общим законом природы. Подобные теории становятся еще более *опасными* (?), если они случайно объясняют какие-нибудь другие явления, как например, теория Вебера объясняет индукционные токи“. Тэт высказался подобным же образом и раньше, в своем „Sketch of Thermodynamics“, Edinburgh 1868.

¹ Gauss, Sämmtliche Werke, V, стр. 627. Письмо датировано 19 марта 1845 г., следовательно, оно было написано за год до опубликования закона Вебера.

² „Pogg. Ann.“, CXXXI, стр. 237, 1867.

386 УНИТАРНАЯ ТЕОРИЯ ЭДЛУНДА

никаких предположений относительно среды, в которой должно распространяться действие, но согласно самой формуле это распространение должно соответствовать распространению волн и других возмущений в упругой среде, так как приведенный потенциал V зависит не только от электрической плотности ρ , но также и *от времени*, а, следовательно, *и от движения*, а постоянная α приблизительно равна *скорости света в эфире*¹. К. Нейман² в 1868 г., отстаивая закон Вебера и давая новый вывод этого закона, тоже исходит из предположения, что электрические действия распространяются от частицы к частице *постепенно с течением времени*. Он четко отличает от электростатического потенциала ee'/r как *излучающего* (emissiv) электродинамический, или *воспринимающий* (receptiv), потенциал

$$\frac{ee_1}{r} \left[1 + \frac{1}{c^2} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 \right];$$

последний он выводит из того представления, что хотя излучающий потенциал распространяется между телами не изменяясь, но он требует для своего распространения времени, так что на движущиеся тела он действует иначе, чем в случае допущения *мгновенного удаления* электрических частиц.

Совершенно то же представление, не упоминая имени Неймана и, по-видимому, не зная его работы, применил Эдлунд непосредственно к действию двух электрических частиц в своей работе 1871 г. «Über die Natur der Electricitat» («О природе электричества»)³, притом в чрезвычайно остроумной и плодотворной форме. Из всех принятых раньше невесомых, — говорит Эдлунд, — в настоящее время остались только две электрические жидкости, которые признаются еще необходимыми с теоретической точки зрения. Но он, Эдлунд, попытается теперь доказать, что все электрические явления как статические, так и динамические могут быть объяснены на основе *одной жидкости, которая, по всей вероятности, представляет собою не что иное, как эфир*. С этой целью он допускает существование тонкой, в высшей степени упругой материи, распространенной во всей вселенной и заполняющей собою не только вакуум, но и те части пространства, которые заняты весомым

¹ Риман говорит об этом соотношении следующее (стр. 237): „При этом позволяю себе сообщить Королевскому обществу замечание, которое приводит в тесную связь теорию электричества и магнетизма с теорией света и лучистой теплоты. Я нашел, что электродинамическое действие гальванических токов поддается объяснению, если принять, что действие какой-либо электрической массы на другие происходит не мгновенно, а доходит до них с постоянною скоростью (равною в пределах ошибок наблюдения скорости света)“. — Georg Friedr. Bernh. Riemann (1826—1866) — профессор математики в Геттингене.

² „Die Principien der Elektrodynamik“, Tübingen 1868; извлечение, составленное Шейблером в „Zeitschr. für Math. u. Physik“, XIII, „Literaturzeitung“, стр. 37, 1868.

³ „Pogg. Ann.“, дополнительный том VI, стр. 95 и 241, 1874; переведено из „Arch. d. scienc. de la Bibl. univ.“, март и апрель 1872; работа эта была представлена Стокгольмской академии наук 10 мая 1871 г. — Erik Edlund (1819—1888)— физик Стокгольмской академии наук.

УНИТАРНАЯ ТЕОРИЯ ЭДЛУНДА 387

веществам. Молекулы этой материи, находясь на определенных расстояниях друг от друга, взаимно отталкиваются по направлению соединяющей их прямой в *обратном отношении квадратов этих расстояний*. Таким образом, электрический эфир в высшей степени сходен с обыкновенным газом. Далее, для установления связи между эфиром и прочей материей остается еще сделать одно допущение, *что в телах, которые мы называем хорошими проводниками, заключенный в них эфир, или, по крайней мере, часть его, легко перемещается от одной точки к другой*, тогда как в непроводниках электричества он в большей или меньшей степени *связан* с весомыми молекулами. Если при этом непроводящее материальное тело есть *газ* или *идеальная жидкость*, то эфирные частицы сохраняют еще *часть своей подвижности*, а именно, поскольку они могут перемещаться вместе с частицами газа или жидкости. Из подвижности эфирных атомов необходимо следует, что в эфире, как в газах и жидкостях, давление должно быть по всем направлениям одинаково. Поэтому к эфиру может быть, с необходимыми модификациями, применен *принцип Архимеда*, согласно которому каждое тело, погруженное в жидкость, теряет в своем весе столько, сколько весит вытесненная им жидкость; но при этом, конечно, здесь следует иметь в виду не тяжесть, а отталкивание эфирных молекул.

Материальное тело, на которое действует электричество, не может двигаться, если заключенный в нем эфир отталкивается со всех сторон с одинаковою силою. Но если отталкивание с одной стороны меньше, чем с других сторон, то тело, если оно свободно, должно двигаться в направлении, определяемом отталкивательною силою. Поэтому при электрическом взаимодействии двух тел необходимо принимать во внимание следующие обстоятельства: «1) Непосредственное действие между эфиром тела *A* и эфиром тела *B*; 2) действие всей окружающей среды, за исключением эфира в *A*, на эфир тела *B*; 3) действие эфира в *A* на тот эфир, который занимает место тела *B* после удаления последнего; 4) действие всей окружающей среды, за исключением пространства, занимаемого телом *A*, на тот эфир, который находится на месте, занимаемом под конец телом *B*, если последнее переместить». Первые два случая соответствуют действию всей окружающей массы эфира на эфир тела *B*, а два последних выражают собою действие всей окружающей массы на эфир того места, которое занимает тело *B*, когда последнее было удалено. Если взять алгебраическую сумму двух первых случаев и вычесть из нее сумму двух последних, то соответственно закону Архимеда получается выражение для движения тела *B*. Сделав затем допущение, *что тело, заряженное положительным электричеством, содержит эфира больше, а тело, заряженное отрицательным, наоборот, содержит меньше, чем в нормальном состоянии*, Эдлунд выводит формулы Кулона для электрических притяжений и отталкиваний; точно так же и явления *индукции статического электричества* непосредственно вытекают из этих допущений. *Разрядный электрический ток* представляет собою тогда не что иное, как *переход эфира из одного тела в другое*. *Гальванический ток* представляет собою перемещение электрического эфира по направлению тока от одной точки к другой; *сила* же тока есть произведение плотности движущегося эфира на его скорость, или,

388 ОСНОВНОЙ ЗАКОН ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА У ЭДЛУНДА

говоря иначе, сила тока пропорциональна количеству эфира, проходящего по цепи за единицу времени. Масса эфира, заключенная в замкнутой цепи, остается одинаковой, независимо от того, существует ли ток или нет. *Электродвижущие силы, под действием которых возникает ток, не могут создавать эфира; их функции ограничиваются лишь тем, что существующее уже в виде теплоты колебательное движение они превращают в поступательное.* Отсюда следует, что теплота должна исчезать в том месте цепи, где действует электродвижущая сила, что подтверждается и явлением Пельтье. То обстоятельство, что любая последующая точка провода может воспринять электричество лишь после того, как все предшествующие ей точки им уже насыщены, делает скорость перемещения электричества по проводам зависимой от свойств последних и составляет причину того, *почему до сих пор не удалось найти определенного числа для скорости распространения электричества в проводах.* Однако все опыты согласны в том, что эта скорость очень велика и не зависит от силы тока.

Переходя к электродинамике, Эдлунд говорит: «В ходе этой работы мы будем исходить из положения, которое, насколько нам известно, еще не было выдвинуто в качестве принципа для объяснения явлений природы ¹, но которое по нашему мнению обладает аксиоматической достоверностью. Положение это заключается в следующем: *все, что происходит или совершается во внешнем мире, требует известного времени. Это время может быть сколь угодно малым, но никогда оно не может быть равным нулю. Время и пространство представляют собою неизбежные условия бытия явлений природы.* Это — априорная истина, подтверждаемая опытом по мере того, как совершенствуются научные методы измерения времени и пространства... Это положение по своему значению может быть приравнено к тому положению, которое рассматривают как основание механической теории теплоты и которое гласит: «Ничто не возникает из ничего». Приведенное положение должно быть применено, *прежде всего*, в области электричества, так как большая скорость распространения этого явления вызывает быстрые видоизменения взаимодействий эфирных молекул».

При помощи этого положения — и это составляет наиболее интересную и плодотворную часть его работы — Эдлунду удается электрические силы, действующие непосредственно на расстоянии, связать с состоянием движения электрических масс и, таким образом, получить формулу, подобную основному закону Вебера, не внося при этом в представление о силах, действующих на расстоянии, еще какого-либо иного допущения, кроме приведенного выше. Две молекулы m и m' на расстоянии r , находясь в состоянии покоя, взаимно отталкиваются с силой mm'/r^2 . Но когда m приближается к m' с постоянной скоростью h ,

¹ В виде совершенно общего принципа это положение действительно не было сформулировано; в этом отношении Эдлунд прав; но в электродинамике, как мы это видели выше, оно применялось и ранее до Эдлунда. Да и вообще для всех физиков, отрицавших непосредственное действие на расстоянии, этот принцип в самом общем его смысле представлялся чем-то само собою разумеющимся и совершенно неизбежным.

ОСНОВНОЙ ЗАКОН ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА У ЭДЛУНДА 389

то создается иное соотношение: когда m находится сначала в точке x , удаленной от m' на расстояние $r+\Delta r$, а затем за время Δt приближается к m на промежуток Δr , то взаимное отталкивание возрастает

от $mm'/(r+\Delta r)^2$ до mm'/r^2 . Но если сближение происходит с достаточно большой скоростью, то отталкивание не успевает соразмерно увеличиться, и в точке q оно меньше того, какое соответствует расстоянию r . При прочих равных условиях это уменьшение является функцией постоянной скорости. Следовательно, отталкивание в точке q можно выразить

с помощью $mm'/r^2f(h)$, где функция скорости $f(h)$ должна быть меньше



Черт. 17.

единицы. Наоборот, для случая удаления m от m' можно легко получить, что отталкивание равно $mm'/r^2F(h)$, где $F(h)$ должно быть больше единицы. Если, далее, скорость, с которой элементы сближаются друг с другом, считать отрицательной, а обратную скорость — положительной, то обе формулы можно объединить в одной $mm'/r^2F(h)$, где $F(h)$

для положительных значений h должно быть больше, а для отрицательных значений меньше единицы. Но еще целесообразнее будет дать последнему выражению вид $mm'/r^2[1+\phi(h)]$, в котором $\phi(h)$ представляет изменения электростатической силы вследствие движения и одновременно со скоростью принимает нулевое значение. Однако эта формула имеет силу лишь в случае постоянной скорости. Если допустить, что m снова приближается к m' , но уже с убывающей скоростью, и снова за то же время Δt проходит тот же путь Δr , то вблизи точки x скорость будет больше, чем около q . Хотя в данном случае молекула m за время, Δt прошла тот же путь, что и в первом случае, и, следовательно, величина $\Delta r/\Delta t$ имеет прежнее значение, тем не менее, сила отталкивания в точке q уже не будет прежней. Молекула m движется вблизи x с большей скоростью, чем около q ; поэтому в тех местах, где отталкивательная сила больше, молекула m пребывает более продолжительное время, чем в тех местах, где эта сила меньше; вследствие этого сила отталкивания в q должна, очевидно, быть больше, чем в первом случае при постоянной скорости. Таким образом, сила отталкивания зависит не только от скорости, но и от изменения последней, причем эта последняя зависимость приводит к увеличению силы отталкивания. Легко показать, что такое усиление происходит при всяком вообще

390 ТЕОРИЯ ИНДУКЦИИ

изменении скорости. Так как под скоростью здесь всегда подразумевается, конечно, относительная скорость, то последняя выражается через dr/dt , а ее изменение через d^2r/dt^2 ; поэтому общая формула взаимодействия двух электрических элементов m и m' имеет следующий вид:

$$-\frac{mm'}{r^2} \left[1 + \varphi \left(\frac{dr}{dt} \right) + \psi \left(\frac{d^2r}{dt^2} \right) \right].$$

Из этой формулы взаимодействия двух электрических молекул путем суммирования легко получается выражение для взаимодействия двух элементов тока, а из последнего, путем сопоставления его с формулой Ампера, можно определить вид функции φ и ψ . Мы не можем дальше следить за выводами, которые привели Эдлунда к формуле, совершенно аналогичной закону Вебера, и должны ограничиться указанием, что на основе двух своих гипотез о применимости принципа Архимеда к учению об электричестве и о постепенном распространении действия электрических сил Эдлунду удалось разрешить и все проблемы *гальванической индукции*. И здесь он стоит посредине между прежними и новыми воззрениями, поскольку индукцию он выводит не только из *непосредственного действия* движущегося эфира на эфир, покоящийся в проводниках, но также — из *действия промежуточной среды*. Когда ток возникает в замкнутой цепи вблизи замкнутого проводника, то, согласно его воззрению, положения равновесия эфирных молекул изменяются не только в замкнутом проводнике, но и в окружающей изолирующей среде, и индукционный ток представляет собою не что иное, как переход молекул из прежнего положения равновесия в новое. На это новое положение молекул в замкнутом проводнике вызывается не только непосредственным действием индуцирующего тока, но также изменением положения равновесия в эфире окружающей изолирующей среды. Лишь только индуцирующий ток прекращается, эфирные молекулы возвращаются в прежнее положение, и тогда в замкнутом проводнике мы имеем индукционный ток прежней силы, но противоположного направления.

Эдлунд чрезвычайно остроумно показал, каким образом старое воззрение о зависимости силы только от расстояния можно соединить с идеей Вебера о зависимости действия силы от скорости и ускорения. Тем не менее, нельзя утверждать, чтобы он содействовал укреплению чисто ньютоновских воззрений на силу, — чего он, впрочем, и не имел в виду; следует, наоборот, признать, что его точка зрения о не мгновенном, а постепенном распространении действия силы была несовместима с представлением о силе как *actio in distans* (действии на расстоянии). Ибо все, что движется в пространстве и движется со скоростью, поддающейся определению, не может быть не чем иным, как материей, и передача его не может заключаться не в чем ином, как в передаче материальных движений.

Теория Эдлунда встретила *возражения в двух* пунктах, которые оказались особенно неприемлемыми приверженцам господствовавших тогда воззрений на сущность электричества. Этими пунктами были, во-

УНИПОЛЯРНАЯ ИНДУКЦИЯ 391

первых, *допущение единой электрической жидкости, тождественной, быть может, с эфиром*, и, во-вторых, *объяснение электрических токов непосредственным течением эфира*. С целью разрешения последнего вопроса Ант. Роити¹ попытался применить метод Физо, при помощи которого последний доказал, что эфир может частично увлекаться движущимися жидкостями. Он пропускал ток один раз по направлению распространения светового луча, а другой раз — в противоположном направлении, рассчитывая с помощью явлений интерференции доказать влияние направления тока на движение света, но эти опыты привели к отрицательному результату; последнему, однако, не придали большого значения как доводу против воззрений Эдлунда. Что же касается борьбы между дуалистической и унитарной теориями электричества, то мы уже раньше указали, что по этому вопросу тоже не пришли ни к какому решению. При рассмотрении теории Эдлунда К. Нейман попытался сослаться в пользу дуалистической теории электрической материи на явления *униполярной индукции*. В 1832 г. во второй серии своих «Экспер. исследований» Фарадей показал, что в проводящей цепи ток может быть индуцирован и в том случае, когда возбуждение вызывается лишь одним полюсом магнита. Один конец проводника он привел в соприкосновение с одним из полюсов магнита, а другой конец он привел в скользящее соприкосновение с серединой магнита; когда затем магнит был приведен в быстрое вращение около своей оси, то в проводнике был замечен индукционный ток. В. Вебер в 1839 г.² установил общие законы этой так называемой униполярной индукции. На основании опытов Плюкера 1862 г.³ Нейман⁴ пришел к выводу, что эти явления не могут быть объяснены унитарной теорией электричества, и В. Вебер⁵ присоединился к его мнению. Но Эдлунд⁶

¹ „Nuovo Cimento" (2), IX, 1873; „Pogg. Ann.", CL, стр. 164. Некоторые соображения Роити характерны для теоретических воззрений нашего времени. „Нет сомнения, — говорит он, — что электрические и магнитные явления представляют собою явления движения... тем не менее, при разработке теоретических проблем электричества мы все еще вынуждены прибегать к старой гипотезе о жидкостях, хотя в реальное существование последних теперь уже больше никто не верит. Все многочисленные гипотезы, которые были предложены для того, чтобы свести эти явления к движению эфира... страдают тем недостатком, что они лишены экспериментальной базы. Вращение плоскости поляризации света при помощи гальванического тока потеряло свою доказательную силу для этой теории, так как считают, что электричество влияет на световой эфир не прямо, а через посредство телесных молекул... Прежде чем оставить настоящую тему, считаю необходимым отметить, что при всем моем уважении к отрицательному мнению известных исследователей о старых электрических жидкостях... я все же считаю неправильным изложение в школах теории электричества и магнетизма на основе новых теорий; последние, правда, находятся как будто в лучшем согласии с остальными теориями, но, тем не менее, они продолжают оставаться чистыми гипотезами и менее понятны, чем старые" („Pogg. Ann.", CL, стр. 170—171). (Сравни примечание 2 на стр. 405).

² „Pogg. Ann.", LII, стр. 353, 1841: „Resultate aus den Beobacht. des magnet. Ver.", стр. 63, 1839.

³ „Pogg. Ann.", LXXXVII, стр. 352, 1862.

⁴ Там же, CLV, стр. 228, 1875 и CLIX, стр. 301, 1876.

⁵ Там же, CLVII, стр. 146, 1876.

⁶ Там же, CLVI, стр. 590, 1875; CLVII, стр. 630, 1876; CLX, стр. 617, 1877.

392 ТЕОРИЯ ГАНКЕЛЯ

в ответ на это указал, что все доводы Неймана против унитарной теории могут быть обращены и против дуалистической теории, и затем доказал, что все явления униполярной индукции могут быть вполне исчерпывающе объяснены на основе унитарной гипотезы.

У Эдлунда все электрические силы представляют собою, в конечном счете, еще *элементарные силы напряжения* эфира, но в это время существовали уже более глубоко обоснованные с кинетической точки зрения теории электричества. Подобную детально разработанную теорию представляет собою *вихревая теория* Ганкеля¹, опубликованная им в 1865 и 1867 гг. Согласно этой теории, при зарядении тела свободным электричеством на поверхности его во всех точках возникают *бесконечно малые круговые колебания (вихри)*, выполняемые большим количеством частиц эфира (с некоторым участием молекул тела). В зависимости от направления круговых колебаний тело представляется наэлектризованным положительно или отрицательно. Эти колебания на поверхности тела следует представлять себе в виде *стоячих* колебаний; но при посредстве окружающего эфира они могут сообщаться и удаленным точкам, причем благодаря силам напряжения эфира возникают силы притяжения и отталкивания. *Изолирующее* вещество можно сравнить с прозрачной стеклянной пластинкой по ее отношению к свету: электрические колебания просто проходят через него; наоборот, на *проводниках* электричества попадающие на них поступательные колебания вызывают стоячие вихри. Исходящие из наэлектризованного тела колебания вызывают на проводнике, например на металлическом шаре, колебания совершенно такого же рода; однако со стороны проводника, обращенной к наэлектризованному телу, они кажутся (так как на них смотрят с противоположной стороны) происходящими в обратном направлении, и только на противоположной стороне шара они кажутся совпадающими с колебаниями наэлектризованного тела. Поэтому первая сторона будет казаться наэлектризованной противоположно, а вторая — одноименно с индуцирующим телом. *Гальванический ток* возникает в проводнике вследствие того, что эфирные молекулы, лежащие в поперечном сечении провода, образуют при участии весомых молекул общее круговое вращение вокруг оси провода и, таким образом, в виде общего вихря распространяются по его длине. *Гальваническая индукция* объясняется тем, что это вихревое движение через поверхность провода сообщается окружающему эфиру. Позднее был предложен целый ряд аналогичных с принципиальной точки зрения *вихревых теорий* электричества, но все они страдают сложностью, неясностью и почти не поддаются математической обработке. Последнее, несомненно, и было причиной того, что физики-математики обратили очень мало внимания на эти теории. Однако и для старого, столь удобного воззрения на электрические силы как на элементарные основные свойства особых электрических материй, проявляющихся непосредственно на расстоянии, *наступали все более и более трудные времена*. Пока во всех явлениях распространения элек-

¹ „Pogg. Ann.“, CXXVI, стр. 440, 1865; CXXXI, стр. 607, 1867. — W. G. Hankel (родился в 1814 г.) — профессор физики в Лейпциге.

ТЕОРИЯ МАКСВЕЛЛА 393

тричества наблюдалась только передача действий через промежуточную среду, независимо от свойств последней, до тех пор можно было действие электрических сил рассматривать как *мгновенное* и непосредственное действие на расстоянии. Однако все яснее выявлявшиеся в новейшее время влияния *поляризации так называемого диэлектрика* заставляли все сильнее думать, что распространение электрических действий целиком *зависит от среды, а, следовательно, и от времени*, т. е. смотреть на их *распространение* как на явление, происходящее только при посредстве среды. В таком случае указанный *характер распространения электрических сил* уже мог быть, по крайней мере, положен в основу математической разработки, независимо от незрелых еще для разрешения сложных вопросов о том, как эти действия возникают и как на них влияет природа материи. На такой именно основе К. Максвелл¹ и построил свои гениальные широко объемлющие математические теории электричества и магнетизма. Исходя из взглядов Фарадея на сущность электричества, Максвелл, не входя в более детальные пояснения, принимает, что всякое наэлектризованное тело приводит окружающую его и наполняющую все пространство среду в *состояние некоторого напряжения*, которое определяется пространственным расположением силовых линий Фарадея, исходящих из этого тела. *А именно, по направлению силовых линий это напряжение действует притягательно, как некоторая сила тяги, а перпендикулярно к этим линиям оно действует отталкивательно, как некоторое давление.* Дав математическое выражение для силовых линий и для обусловливаемого ими состояния напряжения диэлектрика, Максвелл затем приходит к *формулам потенциала* наэлектризованных тел, которые по своим выводам согласуются с данными опыта, по меньшей мере, в такой степени, как и законы, построенные на прежних представлениях о силе. По поводу того обстоятельства, что эта теория не в состоянии более детально связать напряжения со свойствами среды, сам Максвелл говорит следующее²: «Единственное новое в настоящем исследовании заключается в выводе математического выражения для величины натяжения, действующего вдоль силовых линий, и для давления, действующего перпендикулярно к ним, а также в доказательстве, что это особое состояние действительно способно породить те механические силы, которые наблюдаются в электромагнитном поле на проводящем немагнитном и не поддающемся намагничиванию теле. Но каким образом вызывается это вынужденное состояние, а также, каким образом оно поддерживается, об этом я ничего сказать не мог. Следует, однако, констатировать, что взаимные притяжение и отталкивание двух токов могут быть так же хорошо объяснены напряжением состоянием окружающей их среды, как и действием токов на расстоянии. Дальнейшее изучение вынужденного состояния, каким образом, скажем, оно возникает и поддерживается пол действием движения частиц среды, должно составить предмет совершенно иного исследования.

¹ „Treatise on Electricity and Magnetism“, London 1873; переведено на немецкий язык со 2-го издания: „Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus“, Berlin 1883.

² „Lehrb. der Elektr. und Magnet.“, 1, стр. 338.

394 ТЕОРИЯ МАКСВЕЛЛА

Возможно ли произвести подобное исследование, и какие новые гипотезы, быть может, потребуются для него, это не имеет никакого отношения к полученным нами выводам»¹. В другом месте он по тому же поводу говорит²: «При помощи гипотезы напряженного состояния промежуточной среды мы сделали только один шаг в выяснении той роли, какую играет среда в передаче электрической силы с одного наэлектризованного тела на другое, потому что мы еще пока не выяснили, каким образом физически возникает и поддерживается это состояние. Следующий шаг, который нам следовало бы сделать, должен был бы нам показать, каким образом это состояние возникает в результате взаимного действия частиц среды. *Он кажется мне особенно важным потому, что явления, которые до сих пор могли быть объяснены на основе допущения действия на расстоянии, были бы тогда сведены к игре молекулярных сил*». В непосредственной связи с этим темным пунктом теории Максвелла находится другой, а именно, *наша неосведомленность о взаимодействии между весомой материей и промежуточной средой*, или незнание механизма превращения электродвижущих сил в пондеромоторные, и обратно. По этому поводу Максвелл говорит³: «Под электродвижущей силой следует всегда подразумевать такую силу, которая действует только на электричество, но не на тела. Ее, следовательно, никогда не следует смешивать с тем, что мы называем механической силой, так как эта последняя, наоборот, действует только на тела, но никогда не действует на электричество, которое может находиться в телах. *О формальной связи между электродвижущими и механическими силами мы узнаем только тогда, когда полностью будут выяснены отношения электричества к материи*». Надежными основами своей электрической теории Максвелл считает, главным образом, *бесспорные соотношения, существующие между светом и электричеством*, прямо требующие отождествления промежуточной среды, в которой распространяются электрические действия, со световым эфиром. Из этих соотношений особенно обращают на себя внимание следующие три. Во-первых, скорость распространения света совпадает со скоростью, которая получается из данной теории для распространения электромагнитных возмущений в непроводнике и которая равна отношению электростатической единицы электричества к электромагнитной⁴. Во-вторых, со-

¹ К этому Максвелл прибавляет: „Для того чтобы дать читателю понятие о силе предполагаемого натяжения, я отмечу, что в наших широтах магнитная сила земли вызывает натяжение земных магнитных силовых линий примерно в 0,9 мг на 1 кв. дюйм. Наиболее сильное магнитное напряжение, достигнутое Джоулем с помощью электромагнитов („Sturgeon's Ann. of Electricity", V, стр. 187, 1840), составляет около 100 кг на 1 кв. дюйм".

² „Lehrbuch der Elektr. und Magnet.", I, стр. 163.

³ „Lehrb. der Elektr. und Magnet.", II, стр. 257.

⁴ Для доказательства Максвелл приводит следующую таблицу (там же, стр. 543):

Скорость света $\left(\frac{\text{метр}}{\text{секунда}}\right)$:	Отношение электрических единиц:
Физо 314 000 000	Вебер 310 740 000
Аберрация и т. д. } . 308 000 000	Максвелл 288 000 000
Солнечный параллакс } .	
Фуко 298 000 000	Томсон 282 000 000

гласно данной теории показатель преломления (для света с наибольшей длиной волн) должен быть равен корню квадратному из диэлектрической постоянной соответствующей среды, что для парафина доказано с большой точностью ¹. Наконец, *в-третьих*, влияние магнетизма на плоскость поляризации света указывает на столь тесную связь между ними, что Максвелл пытается даже разработать электромагнитную теорию света, исходя из допущения, что свет представляет собой электромагнитное возмущение ². Максвелл заканчивает свою работу следующими ясными словами ³. «Итак, мы видели, что математические выражения для электромагнитного действия сил привели Гаусса к убеждению, что распространение электрических действий со временем должно составить действительную основу теории электродинамики. Но распространение мы можем только представить себе либо в виде материального тела, летящего в пространстве, либо в виде распространения некоторого состояния движения или напряжения, — при посредстве среды, находящейся в пространстве. В теории Неймана принимается, что математическое понятие «потенциал», которого мы ни в коем случае не можем себе представить как нечто материальное, перебрасывается от частицы к частице (независимо от существования среды)... Риман и Бетти, по-видимому, представляли себе это распространение несколько более схожим с распространением света... Однако при всех этих теориях естественно возникает вопрос: если нечто переносится через промежуточное пространство с одной частицы на другую, то в каком состоянии находится это нечто, после того как оно оставило одну частицу и еще не достигло другой?.. Действительно, если вообще энергия передается от одного тела к другому не мгновенно, а в конечное время, то должна существовать среда, в которой она временно пребывает, оставив первое тело и не достигнув еще второго... Поэтому и эти теории должны привести к понятию среды, в которой и происходит распространение. Но коль скоро гипотеза существования среды принята, мы должны, мне кажется... всячески стараться составить себе ясное понятие обо всех деталях ее действия. Это и было моей главной целью при составлении настоящего труда».

Почти все приведенные до сих пор теории электричества принадлежали физикам-математикам, которые стремились разработать определенное представление о сущности электричества, необходимое в качестве твердой базы для их дедукций. Однако новейшие экспериментальные достижения, не поддававшиеся полностью объяснениям на основе обычных допущений, побудили и *физиков-экспериментаторов* заняться новыми для них общими вопросами о природе электричества. Эти новые экспериментальные достижения сводились, главным образом, к *явлениям электрических разрядов в вакууме или в разреженном пространстве*, на важное значение которых указал еще Фарадей. Однако на первых

¹ „Lehrb. d. Elektr. und Magnet.“, II, стр. 543—544.

² Там же, II, стр. 357. и след. Максвелл указывает, что Л. Лоренц в 1867 г. („Pogg. Ann.“, CXXXI, стр. 243) из уравнений Кирхгофа для движения электрических токов вывел аналогичную электромагнитную теорию света, но отмечает, что он, Максвелл, свою теорию опубликовал уже в 1865 г. в „Phil. Trans.“.

³ Там же, II, стр. 606—607.

396 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАЗРЯДЫ В РАЗРЕЖЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

порах исследование касалось преимущественно старых проблем, а именно, проводимости безвоздушного пространства, влияния магнита на явления разряда, а также слоистости света в гейслеровских трубках.

Прежними опытами П. Эрмана ¹, П. Рисса ² и других была, по-видимому, строго доказана *невозможность прохождения электричества через пустое пространство*. Но так как теперь заметили, что в разреженных газах с усилением разрежения разряды электричества не только не ослабевают, но скорее усиливаются, то стали сомневаться в сделанных раньше выводах, а многие физики были даже склонны считать, *что пустота представляет собой наиболее совершенный проводник электричества*. Однако и эта точка зрения вскоре была поколеблена, когда из дальнейших опытов выяснилось, что проводимость газов не повышается непрерывно с разрежением, а для каждого газа имеет свой определенный максимальный предел. В 1866 г. А. де-ла-Рив ³ признал в качестве такого предела для водорода давление в 2,5 мм ртутного столба, а в 1861 г. Гассиот ⁴ дал описание новых своих опытов, из которых вытекало, что пустота совсем не проводит электричества. Объяснение этих интересных явлений было менее трудно, чем это показалось с первого взгляда. Если допустить, что проведение электричества в газах осуществляется не действительным течением электричества, а путем конвекции, — таким образом, что молекулы газа при своих взаимных столкновениях на одной стороне принимают электричество, а на другой его отдают, тогда с увеличением разрежения газа и, следовательно, удлинением среднего пути молекул должна увеличиваться и скорость проведения электричества; но, с другой стороны, ввиду уменьшения массы газа, при посредстве которого происходит проведение, количество проводимого электричества должно уменьшаться; под действием этих двух противоположно направленных причин у каждого газа может создаться свой максимум проводимости электричества при известной степени разрежения. Эдлунд, конечно, принципиально не мог согласиться с таким объяснением. Так как, согласно его теории электрические явления вызываются только поступательным движением эфира, но отнюдь не газовых частиц, то распространение электричества в так называемой пустоте должно быть легче, чем в пространстве, заполненном веществом. Он, правда, не отрицает ⁵, что при *бесконечно большом разрядении* ток под конец встречает *бесконечно большое сопротивление*, но в противовес этому указывает на то обстоятельство, что в пустоте все-таки можно вызвать электрические явления через влияние; что касается указанного выше сопротивления, то он полагает, что оно не представляет собой сопротивления вакуума, а *сопротивление перехода* между твердыми электродами и газом, которое по мере разрежения растет до бесконечности и перевешивает ослабление сопротивления в газе, вызванное его раз-

¹ „Gilb. Ann.", XI, стр. 163, 1802.

² „Dove's Repertorium", II, стр. 13 и след., 1838.

³ „Pogg. Ann.", CXXXI, стр. 447, 1867.

⁴ „Proc. of the Roy. Soc.", XII, стр. 329; „Pogg. Ann.", CXII, стр. 156.

⁵ „Ann. de chim. et de phys." (5), XXIV, стр. 199; XXVII, стр. 114 и др.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАЗРЯДЫ В РАЗРЕЖЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ 397

режением. К его мнению полностью присоединился и Э. Гольдштейн¹. Последний вместе с тем выступил с возражением против довода, который был выдвинут против участия одного лишь эфира в электрическом разряде и который заключался в том, что при разрядах каждый газ дает свой собственный характерный спектр. По его мнению, этот факт очень просто объясняется тем обстоятельством, что сам эфир совершенно не обладает оптической лучеиспускательной способностью и что, следовательно, движения эфира сами по себе не дают света. Только тогда, когда эти движения передаются в разрядных трубках по резонансу остаткам газа, возникают те световые явления, которые, конечно, тогда дают спектр, свойственный соответствующему газу. Э. Видеман² тоже склоняется к этому мнению, он полагает, что незначительное нагревание, которое дает положительный разряд в сильно разреженных газах, представляет собой прямое доказательство хорошей теплопроводности последних. Тем не менее, большинство физиков, по-видимому, не признает еще проводимости вакуума (что, конечно, было бы почти равносильно отказу от прежних воззрений на природу электричества) и склоняется к тому, чтобы выждать более убедительных экспериментальных доказательств этой теории³.

Различие света на аноде и катоде в разреженном воздушном пространстве и существование темного пространства между ними были открыты Фарадеем в 1838 г. В 1843 г.⁴ Абриа, доведя разрежение в электрическом разряде до 2 мм, наблюдал чередующиеся в нем светлые и темные слои. Однако на эти явления обратили так мало внимания, что Ке⁴ мог приписать их открытие себе, а другие физики приписали его Грове⁶. Но с тем большим рвением принялись за объяснение этих явлений, когда интерес к ним вновь пробудился. Рисс⁷ различал *непрерыв-*

¹ „Wiedem. Ann.“, XII, стр. 249, 1881; XXIV, стр. 79, 1885. В последней статье Гольдштейн определенно подчеркивает, что он раньше Эдлунда принял в качестве субстрата разряда в разреженных газах свободный эфир. „В противоположность мнению, — говорит он, — будто в пространстве, заполненном газом, субстратом разряда служат частицы газа, — все равно, действуют ли они при этом путем конвекции, или же они непосредственно проводят ток, я, мне кажется, первый признал субстратом тока свободный эфир... Многократно и почти исключительно цитировавшаяся в новейшее время работа по этому же вопросу Эдлунда была представлена им Шведской академии два месяца спустя после появления моей работы в „Wied. Ann.“ (также „Sitzungsber. d. Berl. Akad.“, стр. 63, 1884).

² „Wiedem. Ann.“, VI, стр. 298, 1879; G. Wiedemann, Die Lehre von der Elektrizität, IV, стр. 591, Braunschweig 1885.

³ А. Феппл (A. Föppl, „Wied. Ann.“, XXXIII, стр. 492, 1888) на основании новых опытов снова склоняется к мысли, что вакуум не может быть хорошим проводником электричества.

⁴ „Ann. de chim. et de phys.“ (3), VII, стр. 462.

⁵ „Comptes rendus“, XXXV, стр. 949, 1852; „Pogg. Ann.“, дополнит. том IV, стр. 507. — Jean Ant. Quet (1810—1884) — ректор Безансовской академии.

⁶ „Phil. Trans.“, стр. 87—101, 1852.

⁷ „Pogg. Ann.“, XCVIII, стр. 571, 1856; СП, стр. 177; CVI, стр. 56. Гассиот получал слоистый свет не только при помощи индукционных аппаратов, но и при помощи постоянных токов сильных вольтовых батарей. Отсюда он вывел заключение, что и обыкновенные разряды последних прерывисты и что эти разряды тоже состоят из ряда пульсаций, скорость которых зависит от величины сопротивления („Pogg. Ann.“, CXII, стр. 158, 1861).

398 ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ВАКУУМА

ные и прерывистые разряды, в зависимости от того, протекает ли электричество в хороших проводниках сплошным током или же оно пробивается через дурные проводники с перерывами. Слоистость света он объяснял прерывистыми частичными разрядами, проходящими в газах отдельно друг от друга. Ке и Сегэн¹ объясняли слои света *слоями газов*, которые, подобно твердым непроводникам, под действием электрической индукции распадаются на чередующиеся слои положительного и отрицательного электричества. Огюст де-ла-Рив² экспериментальным путем установил, что темное катодное пространство проводит лучше, чем светлый слой, и поэтому сравнил слоистый свет с цепью, составленной попеременно из платиновых и серебряных звеньев, в которой только первые накаливаются от гальванического тока. Совершенно иное объяснение, в большей мере примыкающее к механической теории газов, дали этому явлению Г. Видеман и Рюльман³. По их представлению частицы газа отбрасываются от обоих электродов с такою скоростью, что они начинают светиться; достигнув соседнего слоя покоящегося газа, они теряют свою живую силу, но при этом они обмениваются скоростями с противоположными электрическими частицами газового слоя, так что вместо них дальше идут вперед, излучая свет, соответствующие электрические частицы газового слоя. Места, где обмениваются друг с другом потоки молекул, несущиеся с противоположных электродов, соответствуют темным слоям разрядной трубки. Однако в начале семидесятых годов, благодаря усовершенствованию способов получения вакуума, эти явления так усложнились, что объяснение их без допущения новых начал, новых состояний весомой материи или нового непосредственного воздействия эфира стало невозможным. Ряд подобных работ открыл в 1869 г. Гитторф⁴ своим большим исследованием «Über die Elektrizitätsleitung der Gase» («Об электропроводности газов»). В нем он показал, *что темный мерцающий свет у катода, при понижении давления ниже 1 мм ртутного столба, очень быстро распространяется и, наконец, заполняет всю трубку; что свет этот, попадая на стенки трубки, повсюду вызывает довольно сильную фосфоресценцию; и, наконец, он подробно описал*

¹ „Ann. de chim. et de phys." (3), LXV, стр. 317, 1862.

² „Pogg. Ann.", CXXXI, стр. 446 и 577, 1867. — Aug. de la Rive (1801—1873) — сначала профессор физики в Женеве, потом частное лицо.

³ „Ber. d. K. Sächs. Gesellsch. d. W.", XXIII, стр. 333, 1871; „Pogg. Ann.", CXLV, стр. 394; продолжение статьи одного лишь Видемана в „Pogg. Ann.", CLVIII, стр. 85 и 252, 1876. — R. Rühlmann — преподаватель гимназии в Хемнице.

⁴ „Pogg. Ann.", CXXXVI, стр. 1 и 197; продолжение в „Pogg. Ann.", юбил. том, стр. 430, 1874. Очень характерны слова Гитторфа о теоретической важности явлений разрядов: „Наиболее темной частью современного учения об электричестве является бесспорно процесс, с помощью которого осуществляется прохождение тока в газообразных телах. В то время как для твердых и жидких проводников, будь то металлы или электролиты, фактические данные приведены в связь и охвачены законом Ома, наши сведения по вопросу о проводимости газов, несмотря на труды превосходных физиков, крайне отрывочны и зачастую базируются на неполных и разрозненных наблюдениях. Теория электрической искры, этого наиболее давно известного и наиболее резко бросающегося в глаза явления, станет возможной лишь при более совершенном состоянии наших знаний" („Pogg. Ann.", CXXXVI, стр. 1).

ЛУЧИСТАЯ МАТЕРИЯ КРУКСА 399

разнообразные влияния магнита на свет гейслеровских трубок, что, впрочем, отчасти было уже известно и раньше. Однако гораздо большую сенсацию вызвали соответствующие наблюдения Крукса ¹, описанные им в конце семидесятых годов, а также предложенное им широкое теоретическое обоснование этих явлений. Крукс тоже исходил из наблюдения, что с усилением разрежения темный свет катода все больше распространяется и, наконец, совершенно вытесняет анодный свет. Так как с разрежением газа увеличивается и средняя длина свободного пути его частиц, то естественно было распространение темного катодного пространства поставить в связь с удлинением *свободного пути*; но Крукс полностью отождествил обе эти величины. *По мнению Крукса, когда благодаря разрежению свободные пути газовых частиц становятся сравнимыми с размерами сосуда, тогда молекулярное состояние газов коренным образом изменяется; в этом случае вещество, находящееся в трубке, уже нельзя относить к газообразному агрегатному состоянию, и оно подчиняется совершенно иным законам, чем газ; Крукс называет это ультрагазовое состояние четвертым агрегатным состоянием, а материю в этом состоянии он называет «лучистой материей»* ². Молекулы этой ультрагазовой материи отбрасываются от электродов с огромной скоростью, причем с катода еще с большей скоростью, чем с анода. Темное катодное пространство есть, следовательно, то пространство, по которому отрицательные молекулы газа, отлетая от катода, несутся свободно по прямым линиям, ни с чем не сталкиваясь, и на границе которого они задерживаются летящими им навстречу положительными молекулами. Относительно физических свойств лучистой материи Крукс устанавливает следующие законы: 1) *Лучистая материя всюду, где она появляется, вызывает сильное фосфорогенное действие*. Если разрежение довести до того, что темное катодное пространство достигнет противоположной стенки, то последняя под действием ударов газовых частиц начинает светиться; в этом потоке молекул фосфоресцируют и другие

¹ Первое сообщение по поводу этих наблюдений было сделано Круксом Королевскому обществу 5 декабря 1878 г.; оно напечатано в извлечении в „Proc. of the Roy. Soc.“, XXVIII, стр. 103, 1878 под заглавием: „On the illumination of lines of molecular pressure and the trajectory of molecules“; подробно — в „Phil. Trans.“, стр. 135, 1879. В этих же журналах были помещены дальнейшие многочисленные статьи Крукса на эту тему („Proc. of the Roy. Soc.“, XXVIII, стр. 477; XXX, стр. 469 и т. д.). Обширный доклад, сделанный Круксом 22 августа 1879 г. в Шсффильде в Британской ассоциации, был переведен на немецкий язык и издан под заглавием: „Strahlende Materie oder der vierte Aggregatzustand“, Leipzig 1879.

² Выражение „*лучистая материя*“ Крукс позаимствовал у Фарадея, который применил его в 1816 г. в своих первых опытах над свойствами материи. В 1848 г. Зантедески тоже открыл „un quarto stato della materia“ (четвертое состояние материи), в которое она приходит при очень высоких температурах. Установив в обжигательной печи друг против друга две глиняные пластинки, причем одна из них была снабжена рисунком из окислов железа и кобальта, а другая была не окрашена, он заметил, что в сильном жару печи рисунок точно отпечатался и на неокрашенной пластинке. Это явление он приписал излучению окислов и для объяснения этого явления допустил существование четвертого состояния, „состояния излучения материи“ („Die Fortschritte der Physik im Jahre 1848“ — из „Raccolta fisico-chimico-italiana“, III, 1848).

400 ОПЫТЫ ГОЛЬДШТЕЙНА

вещества, например алмаз, глинозем и пр. Материя в ее обычном газообразном состоянии не вызывает никакой фосфоресценции, так как скорость ее молекул слишком мала. 2) *Лучистая материя движется прямолинейно.* Так, например, если в трубку с сильно разреженным воздухом впаяны в любых местах три положительных и один отрицательный полюс, то при умеренной степени разрежения вся трубка заполняется светом; при сильном же разрежении фосфоресцирует только та часть стенки, которая лежит против отрицательного электрода; ее положение, следовательно, не зависит от расположения трех положительных электродов. 3) *Падая на твердое тело, лучистая материя дает тень.* Если на пути лучей, исходящих от катода, поставить крест (прозрачный), то на фосфоресцирующей стенке наблюдается его тень. 4) *Лучистая материя производит сильное механическое действие* — она приводит в движение поставленную на ее пути маленькую световую мельницу. 5) *Лучистая материя отклоняется магнитом; параллельные потоки лучистой материи относятся друг к другу не как гальванические токи, а как одноименно наэлектризованные тела.* 6) *В тестах, на которые она падает, лучистая материя развивает теплоту.* Если катоду придать форму вогнутого зеркала, то при достаточной силе разряда в фокусе этого зеркала могут быть расплавлены даже сплавы иридия с платиной¹.

Крукс ожидал очень многого от вновь открытого им состояния материи, от *нового мира*, к которому применима теория материальности света — мира, который мы в состоянии наблюдать только извне, но в который мы никогда не будем в состоянии проникнуть². Однако большинство других физиков, и, прежде всего немецких, было весьма мало склонно к принятию этого нового мира, полагая, что покуда можно еще обойтись с тремя прежними агрегатными состояниями, не прибегая к четвертому. Э. Гольдштейн, описавший уже ранее Крукса некоторые особенности катодного света в 1880 г., показал³, что предложенное Круксом отождествление длины темного катодного пространства с длиной свободного пути газовых молекул ни в коем случае не может быть принято. Он установил на пути катодных лучей в трубке фосфоресцирующую пластинку таким образом, что она частично еще лежала в темном катодном пространстве. Тогда обнаружилось, что это пространство не имеет резко очерченной границы и что сила света изменяется лишь постепенно. При разрежениях не ниже $1/125$ мм, когда длина свободного пути, по Максвеллу, должна быть равна 5,7 мм, толщина темного слоя оказалась в 10 раз большей и пластинка ярко фосфоресцировала даже на расстоянии 0,9 м от катода. Кроме того,

¹ По „Jahrb. der Erfindungen“, XVI, стр. 185 и дальше, 1880.

² „Явления в этих разреженных трубках, — говорит Крукс, — открывают перед физикой новый мир — мир, в котором материя существует в четвертом состоянии, к которому применима корпускулярная теория света, в котором свет не всегда движется по прямой линии, — мир, в который мы никогда не будем в состоянии войти и по отношению к которому мы должны удовольствоваться наблюдениями и опытами со стороны“.

³ „Monatsber. d. Berl. Akad.“, стр. 82, 1880; также „Wiedem. Ann.“, X), стр. 844.

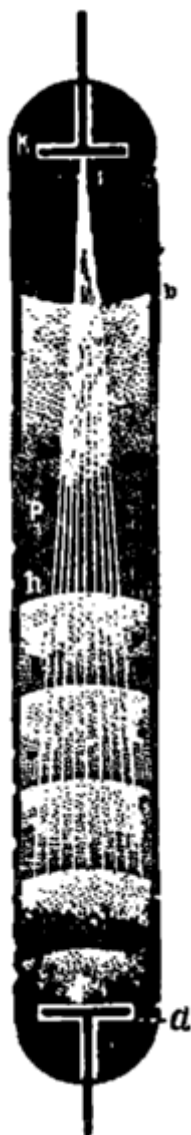
ВОЗЗРЕНИЯ ГИНТЛЯ И ПУЛУЯ 401

катодные лучи в действительности заканчивались вовсе не на границе темного слоя, — при очень сильных разрежениях они оказались в состоянии пронизать даже слоистый свет анода. В. Ф. Гинтль¹ указал, что все явления в кружковых трубках можно объяснить и без помощи ультрагазового состояния материи, если только допустить, что электрический ток непрерывно срывает с катода металлические частицы, которые затем уходят от полюса и движутся прямолинейно до тех пор, пока какое-либо препятствие не изменит их движения или же их поглотит. Пулуй² развил дальше эту гипотезу, связав ее с унитарной теорией электричества Эдлунда. Согласно теории Пулуя химические силы развивают в гальванической батарее поток эфира, который, входя в проводник с большим сопротивлением, должен здесь застаиваться и образовать положительный полюс, а при выходе из этого проводника должен разрезаться и образовать отрицательный полюс. Поэтому-то в светящейся дуге электрической лампы, где воздушное пространство между остриями углей представляет большое сопротивление, положительный полюс образуется в месте выхода электричества. Но для индукционного тока в гейслеровских трубках создаются обратные условия, так как при высоком напряжении тока воздушное пространство в трубках представляет меньшее сопротивление. Здесь, на месте входа эфирного потока в газовый столб, образуется недостаток эфира, а вместе с тем и свободное отрицательное напряжение, а на другом конце возникает свободное положительное напряжение. Между обоими этими концами должно существовать, по крайней мере, одно место, где напряжение равно нулю, — это и есть граница темного катодного пространства; слоистость света указывает на то, что таких мест с нулевым напряжением имеется много. Сильный поток эфира, исходящий из отрицательного полюса, срывает с последнего частицы его вещества, которые, разлетаясь от катода по прямолинейным путям, вызывают явления мнимой лучистой материи, но истинная природа которых неопровержимо проявляется в красивых металлических зеркальных налетах, образующихся на стенках трубок³. При ударе катодных частиц о стенки их живая сила превращается в теплоту; однако эта теплота недостаточно велика, чтобы вызвать фосфоресценцию, поэтому последнюю следует приписать эфиру, который увлекают с собою катодные частицы. В самом деле, при столкновении этих отрицательных электродных частиц со стеклянной стенкой происходит, помимо сотрясения материальных моле-

¹ „Studien über Crookes' strahlende Materie“, Prag 1880.

² „Strahlende Elektrodenmaterie“, „Wien. Ber.“, LXXXI, 2 отдел, стр. 864, 1880,

³ Относительно срывания током частиц с катода аналогично высказался уже Плюкер в 1858 г. („Pogg. Ann.“, CV, стр. 67): „Мое мнение, что металлические частицы не переходят с одного электрода на другой, как видно, подтверждается Гассиотом („Proc. of the Roy. Soc.“, март 1858). Металлические частицы срываются только с одного электрода, отрицательного, и направляются на соседние части внутренней стенки трубки; этот переход частиц происходит, из какого бы металла ни состояли электроды. Соседняя часть стенки стеклянной трубки постепенно чернеет под влиянием налета чрезвычайно тонко распыленного металла, а при большой толщине этого налета, в конце концов, образуется красивое металлическое зеркало“.



кул, обмен эфира между стенками и молекулами, вызванные этим сотрясения эфирных оболочек превращают каждое место стенки в центр новых эфирных волн, которые мы и воспринимаем в качестве света фосфоресценции.

Если приведенные объяснения все еще базировались на основной идее Рюльмана и Г. Видемана, что катодные лучи вызываются движением материальных частиц, сорванных с электродов, то Э. Видеман считал возможным отказаться и от этой идеи; по его мнению, *катодные лучи представляют собою не что иное, как лучи света* и, прежде всего потому, что при незначительности массы переносимой весомой материи пришлось бы, для объяснения нагревания стеклянных стенок трубки, приписать сорванным материальным частицам огромные скорости. Э. Видеман описывает процесс разряда следующим образом ¹. Поступающее из машины электричество, которое можно рассматривать как свободный эфир, накапливается на поверхности электродов и вызывает в окружающей среде диэлектрическую поляризацию, заключающуюся в том, что эфирные оболочки отдельных газовых молекул деформируются, между тем как вращение молекул около их осей происходит в прежнем направлении. Когда плотность электричества на электродах достигает известной степени, происходит его разряд, т. е. изменение диэлектрической поляризации распространяется по эфирным оболочкам газовых молекул и приводит их, таким образом, в колебания ², а одновременно и свободный эфир может переходить от молекулы к молекуле. Наблюдавшееся в разрядных трубках столь большое различие между положительным и отрицательным электричеством объясняется, быть может, тем, что распространение последнего обуславливается только распространением диэлектрической поляризации, между тем как первое связано также с переходом свободного эфира. Световые явления в кружковых трубках с пластинчатой формой электродов протекают следующим образом ³ (см. приложенный черт. 18). Сначала возле катода располагается темное, почти лишенное света

пространство, темное катодное пространство *k*; за ним следует резко ограниченный со стороны катода слой, светлый катодный слой *b*; от последнего идет по направлению к аноду постепенно ослабевающий свет, мерцающий свет *bp*; последний в свою очередь отделяется темным промежутком *bp* от слоистого столба анодного света. Наконец, все это пронизывается темными катодными

¹ „Wiedem. Ann.“, X, стр. 250, 1880

² Живая сила этих колебаний, которая не зависит от поступательных тепловых движений молекул, объясняет установленное Видеманом свечение газа при незначительных температурах, лежащих далеко ниже 100° („Wiedem. Ann.“, VI, стр. 298). Однако при столкновении молекул и эта живая сила превращается в поступательное тепловое движение.

³ „Wiedem. Ann.“, XX, стр. 756, 1883.

ТЕОРИЯ КАТОДНЫХ ЛУЧЕЙ ВИДЕМАНА 403

лучами Im , которые исходят от катода и фосфоресцируют лишь при встрече с какими-либо телами. Объяснение этих явлений вытекает из приведенного представления о сущности электрического тока. С анода распространяются волны диэлектрической поляризации, сопровождаемые потоками свободного электричества, которые отражаются от светлого катодного слоя. Между этими отражениями и вновь прибывающими волнами происходит интерференция, образуются волны максимального и минимального движения, по отношению к которым протекающее электричество ведет себя, конечно, неодинаково: в первых местах газы светятся, во вторых нет. Темное пространство между анодным и катодным светом является местом первой интерференции. Катодные лучи ¹ не имеют никакого отношения к электрическому току или к переходу самого электричества; они представляют собою лучи света со столь короткой длиной волны, что они невидимы; но, падая на весомую материю, они замедляются в своих колебаниях и превращаются в светящиеся волны. С этим допущением вполне согласуется то обстоятельство, что катодные лучи с их поперечными колебаниями свободно пронизывают анодный свет, состоящий из продольных колебаний; что, при незначительной длине волны, катодные лучи поглощаются даже тончайшими слоями вещества; что они вызывают фосфоресценцию, флюоресценцию и химическое разложение ²; что, подобно обыкновенным световым лучам, они отражаются и т. д.

Итак, хотя, таким образом, экспериментальные физики все больше и больше приближались к *унитарной*, а, следовательно, и к *эфирной теории* электричества, тем не менее, к *кинетической* теории в собственном смысле они еще не пришли; источником электрических сил все еще служили упругие *силы* эфира или же вопрос в этом направлении вообще не обсуждался. Только путем аналогий пытались со-

¹ „Wiedem. Ann.“, XX, стр. 781.

² На основании явлений сильной химической диссоциации, проявляющихся всегда в спектрах калильного света на отрицательном полюсе, Артур Шустер (профессор в Манчестере) стал снова склоняться к старым теориям разряда в газах. По его мнению, движение электричества в газах сопровождается разложением молекул и обменом атомов. На отрицательном полюсе разложение, по-видимому, происходит наиболее сильно. Вследствие быстрого падения потенциала вблизи катода отрицательные атомы должны оставлять его с большой скоростью и темное катодное пространство наполнено такими атомами. Граница этого пространства представляет отрицательный полюс для положительного разряда. Когда темное пространство мало и не достигает положительного полюса, то разряд идет от последнего к отрицательному полюсу. Когда же, при более значительных разрежениях, темное пространство заходит за положительный полюс, то разряд идет от него к соседним точкам темного пространства и, таким образом, в сторону от отрицательного полюса („Nature“, XXX, стр. 230, 1884; „Proc. of the Roy. Soc.“, XXXVII, стр. 317, 1884). О. Леман исследовавший очень подробно самые разнообразные формы разряда в зависимости от силы электричества, плотности газа, расстояния, числа и формы электродов, формы сосуда, температуры и пр., не исследовав, однако, указанных только что явлений в сильно разреженных газах,— утверждает, что все особенности электрических разрядов в газах могут быть полностью объяснены лишь на основе теории Фарадея, согласно которой разряд вызывается своеобразной поляризацией диэлектрика („Wiedem. Ann.“, XXII, стр. 305, 1884).

404 ОПЫТЫ БЬЕРКНЕСА

здать возможность кинетических столкновений для притягательных и отталкивательных сил электричества. Уже неоднократно обращали внимание на известное подобие формул для течения воды и воздуха по узким трубкам с формулами, характеризующими течение теплоты и электричества. Кроме того, упомянутые нами выше акустические притяжения и отталкивания показали, что колеблющаяся среда может действовать притягательно и отталкиовательно благодаря одним только своим движениям, без участия какой-либо особой силы. Теперь же в подтверждение этого последнего явления стали приводить много других примеров, которые должны были явиться прямой иллюстрацией электрических действий. Проф. К. А. Бьеркнес из Христиании производил в 1881 г.¹ на Парижской электрической выставке опыты с вибрирующими барабанами, помещенными под водой. Барабаны эти состояли из металлических колец, около 2 см диаметром, с натянутыми на обеих сторонах каучуковыми пластинками; к кольцам были припаяны трубки, которые служили как для поддержания барабанов, так и для попеременного сгущения и разрежения в них воздуха. Когда в двух таких барабанах происходят одновременно сгущение и разрежение, то они сближаются, в противном случае они отталкиваются. Так как при этом действующие силы изменяются обратно пропорционально квадрату расстояния между барабанами, то пульсирующие тела можно приравнять к магнитным полюсам или к наэлектризованным телам. Когда подобный барабан был разделен пополам перегородкой, то при попеременном сгущении и разрежении воздуха в обеих половинах барабан вел себя, как магнит с *двумя полюсами*, — одной стороной он притягивал, а другой отталкивал. Подобно пульсирующим барабанам, действовали друг на друга под водою и маленькие шарики, совершавшие маятникообразные колебания около поперечного рычажка; при одинаковом направлении своих колебаний они взаимно отталкивались, а при противоположном — притягивались. Так как при этом противоположные стороны шариков всегда находятся в противоположных фазах своего движения, то такой колеблющийся шарик всегда подобен двухполюсному магниту. Движения барабанов или шариков сообщаются, конечно, воде, а через нее и другим находящимся в ней телам. Пробковый шар, вследствие своей легкости, воспринимает колебания сильнее, чем вода, и удаляется от пульсирующего тела, но тело более тяжелое, чем вода, по-видимому, притягивается. Когда вблизи пульсирующего барабана горизонтально подвешивается палочка из пробки, то она, подобно магнитному телу, располагается вдоль по оси, металлическая же палочка, подобно диамагнитному телу, располагается экваториально. Наконец, Бьеркнесу удалось выявить характер движения воды около пульсирующего тела и показать, что эти движения вблизи пульсирующего тела совершенно соответствуют магнитным силовым линиям. В следующем году подобные же опыты были произведены в воздухе Августом Штро² в Лондонском обществе теле-

¹ „Nature". XXIV, стр. 360, 1881; „Beibl. zu Wied. Ann.", VI, стр. 47, 1882 „Jahrb. d. Erfind.", XVIII, стр. 260, 1882.

² „Journ. of the Soc. of Telegraph Engineers", XI, стр. 192, 1882; „Jahrb. d. Erfind.", XVIII, стр. 265, 1882.

ОПЫТЫ ШТРО И ЭЛИ 405

графистов. Он применял для этого маленькие деревянные чашечки с натянутыми на их отверстия упругими перепонками; с противоположной стороны каждая чашечка при помощи гибкой трубки сообщалась с полостью, в которой звучащая труба поддерживала правильные колебания воздуха. Здесь в воздухе получались те же явления притяжения и отталкивания, какие раньше были получены Бьеркнесом под водой. Покоящееся тело, рука, карта и пр. всегда, подобно немагнитному телу, вызывали притяжение; линии давления вполне соответствовали магнитным силовым линиям. Наконец, в 1882 г. Б. Эли¹ показал совершенно такие же явления на шарах, вращающихся под водой. Два вращающихся рядом шара при одинаковом направлении вращения отталкиваются, а при противоположном направлении притягиваются; два шара, расположенных один над другим и вращающихся около общей вертикальной оси, дают прямо противоположный эффект.

Совершенно ясно, что все эти *аналогии* между действием колеблющихся и наэлектризованных тел не могут еще заменить кинетической теории электричества. Не приходится также сомневаться и в том, что подобная теория едва ли встретит всеобщее признание раньше, чем сила тяготения тоже получит кинетическое объяснение. Но для того чтобы правильно оценить *плодотворность* и *ферментативное значение* таких аналогий, достаточно вспомнить плодотворное влияние примененных Г. Юнгом акустических аналогий на развитие волновой теории света. Наглядным свидетельством того, насколько общими стали в теории электричества скептическое отношение к непосредственному действию на расстоянии и потребность в кинетической теории силы, могут послужить нижеприведенные слова Г. Видемана, заимствованные из его обширного руководства «Die Lehre von der Elektrizität»; эти слова тем более заслуживают внимания, что при теоретических своих выводах Видеман все еще исходит из старого допущения об электрических жидкостях, непосредственно действующих на расстоянии: «Благодаря теоретическим изысканиям Максвелла и Гельмгольца мы получили возможность свести распространение магнитных и электрических возмущений к уравнениям, совершенно тождественным уравнениям двух взаимно перпендикулярных световых колебаний. Поэтому представляется естественным свести магнитные и электрические возмущения к соответствующим движениям светового эфира... Если удастся еще в большей мере свести электрические явления к движениям эфира, то не только произойдет слияние двух обширных областей физики, но мы получим также возможность свести все физические явления к движениям двух видов материи, молекул и атомов тел и частиц эфира»².

¹ „Journ. de Phys." (2), I, стр. 71, 1882; „Beibl. zu Wied. Ann.", VI, стр. 387, 1882.

² „Die Lehre v. d. Elektrizität, IV, стр. 1203, 1885. В новейшее время Г. Герц (профессор в Бонне, „Wiedem. Ann.", XXXI, стр. 421 и 543; XXXIV, стр. 155, 273, 551 и 607; XXXVI, стр. 1 и 769; XXXVII, стр. 395) путем простых и надежных опытов установил, что электрические силы, как на это указывал Фарадей, представляют собою самостоятельно существующие в пространстве поляризации

406 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И ВНУТРЕННЕЕ СОСТОЯНИЕ МАТЕРИИ

Нам остается еще упомянуть о целом ряде отдельных наблюдений, характерных для современного состояния теории электричества, наблюдений, которые указывают на тесную *связь электрических явлений с внутренними движениями и состояниями материи*, но представляют еще известные трудности для объяснения за отсутствием у нас достаточной осведомленности о взаимодействии между весомой материей и эфиром. Гагенбах ¹ показал, что *возникновение электричества от трения* зависит не столько от природы веществ, сколько от структуры и вида их поверхности. Так, например, стекло, натираемое кошачьим мехом, в зависимости от способа натирания и вида поверхности, наэлектризовывалось то положительно, то отрицательно. Бумага, в зависимости от материала, из которого она была сделана, а также в зависимости от ткани, вела себя тоже различно. Черный и белый шелк стоят в ряду напряжений далеко друг от друга. И металлы, при натирании их различными непроводниками, наэлектризовываются противоположно. П. Вольпичелли ² нашел, что все металлические проволоки при изгибании дают слабые токи, причем последние, по крайней мере, когда изгибания не следуют часто друг за другом, имеют не термоэлектрическое происхождение, так как они исчезают вместе с изгибанием и меняют свое направление, когда сгибание сменяется разгибанием. Ускорение процесса сгибания усиливает ток. П. Жулен ³ указал, что столь часто наблюдаемое *сильное развитие электричества на передаточных ремнях* быстро вращающихся колес машин происходит не столько от трения, так как оно появляется и в том случае, когда бумага с сушильного барабана снята, — сколько вследствие быстрого перерыва соприкосновения ремня с ободом. Квинке уже

(промежуточной среды); что действие электрической индукции распространяется в пространстве с конечною скоростью и что оно, подобно свету, может дать явления отражения, а также интерференции. „Нашим описанным только что опытам, — говорит он (указанное место, XXXIV, стр. 622), — соответствует в акустике тот опыт, с помощью которого демонстрируют, что с приближением камертона к стене на некоторых определенных расстояниях от нее тон его усиливается, на других ослабляется. В оптике же наши опыты находят свою аналогию в ллойдовской форме френелевского опыта с зеркалами. В оптике и акустике указанные опыты являются аргументами в пользу волновой природы света и звука; совершенно так же и в описанных здесь явлениях мы должны усмотреть аргументы в пользу волнообразного распространения индукционного действия электрического колебания... Я описал опыты этой работы... не опираясь в существенных пунктах на какую-либо особую теорию... Однако ясно, что эти опыты представляют собою в такой же мере доводы в пользу теории электродинамических явлений, которая была впервые построена Максвеллом на основе воззрений Фарадея”.

¹ „Carl's Repertorium der Physik”, VIII, стр. 65, 1872.

² „Comptes rendus”, LXXIV, стр. 44, 1872. При сгибании медных проволок, у которых токи наиболее сильны, эти явления были замечены уже раньше Пельтье и де-ла-Ривом.

³ „Comptes rendus”, LXXVI, стр. 1299 и 1478, 1873. Д. М. Батчельдер наблюдал в 1847 г. („Silliman's Journ.”, III, стр. 250, 1847), что передаточный ремень длиной в 35 фут. и шириною в 9 дюйм., соединявший два деревянных барабана и пробегавший 1600 фут. в минуту, давал электрические искры на расстоянии в 1 фут 5 дюйм. Очень сильное образование электричества наблюдал также Гольмс на кожаных ремнях шерстяной фабрики в Глазго, где пришлось даже устроить особые приспособления для ограждения от него рабочих.

в 1859 г.¹ открыл, что *при протекании жидкостей через пористые стенки* возникают электрические токи в направлении течения жидкости. Целльнер в 1872 г.² показал, что не только протекание жидкостей по капиллярным трубкам, но и всякое вообще трение жидкостей о твердые тела всегда возбуждает электричество; на этом явлении, а также на допущении существования течений в жидком ядре земли, он основал теорию *земного магнетизма*. Эти явления, связанные с течением, неоднократно после этого подвергались сомнению³, но, в общем, они все-таки подтвердились⁴. После этого в 1876 г.⁵ Целльнер подвел итоги своим экспериментальным исследованиям, а вместе с тем и изложил объяснение этих явлений в следующих словах: «При скользящем трении двух тел на поверхности их соприкосновения возникают такого рода электродвижущие силы, что при благоприятных условиях они дают токи, которые стремятся сместить тела в направлении, противоположном их относительному движению»⁶. Этим были объяснены не только токи при прохождении жидкости *через диафрагмы*, но и, обратно, *увлечение электрическими токами материальных частиц* как прямо противоположное явление. Правда, Эдлунд⁷ более глубоко объяснил первое явление на основе своей теории, допустив, что текущие жидкости способны приводить непосредственно в движение электрическую жидкость и увлекать ее с собою; но Эльстер⁸ утверждал, что свободные струи жидкостей в воздухе не дают никакого электричества. Упомянутое выше захватывание материальных частиц текущим электричеством открыл уже в 1807 г. Рейсс⁹, заметивший, что жидкость, разделенная на две части пористой перегородкой, переносится током по направлению последнего. Подобные же опыты произвел Порретт¹⁰ в 1816 г. Прибор для более точного наблюдения этих явлений был впервые устроен Г. Видеманом в 1852 г.¹¹, и тогда этот процесс обратил на себя общее внимание физиков. Однако многие физики склонялись все-таки к мысли, что причиной переноса жидкости не является в данном случае электричество, и приписывали это явление диоомосу, видоизмененному под влиянием электричества, —

¹ „Pogg. Ann.“, CVII, стр. 1, 1859; CX, стр. 38, 1860.

² „Ber. d. K. Sachs. Ges. d. Wissensch.“, XXIV, стр. 317, 1872; „Pogg. Ann.“, CXLVIII, стр. 640, 1873.

³ Например, Беетц, „Pogg. Ann.“, CXLVIII, стр. 486, 1873.

⁴ Дорн, „Pogg. Ann.“, CLX, стр. 56; Г. Гага, „Wiedem. Ann.“, II, стр. 326; И. В. Кларк, там же, стр. 335.

⁵ „Pogg. Ann.“, CLVIII, стр. 497.

⁶ Там же, CLVIII, стр. 498.

⁷ „Wiedem. Ann.“, I, стр. 161.

⁸ Там же, VI, стр. 553.

⁹ „Mém. de la soc. imp. de nat. á Mosc.“, II, стр. 327, 1809; по Видеману, „Elektricität“, II, 166 и 181.— Ferd. Friedrich Reuss (1788—1852)— профессор в Москве.

¹⁰ „Gilbert's Ann.“, LXVI, стр. 272.

¹¹ „Pogg. Ann.“, LXXXVII, стр. 321, 1852; последующие многочисленные наблюдения — там же, XCIX, стр. 177, 1856. О находящемся, по-видимому, в известной связи с этими явлениями *странствовании ионов* была опубликована в том же 1856 г. довольно обстоятельная работа Гитторфа (там же, XCVIII, стр. 1).

408 УДЛИНЕНИЕ ПОД ВЛИЯНИЕМ ТОКА

так как тогда еще не удавалось воспроизвести переноса жидкости током при отсутствии диафрагмы. Последнее удалось осуществить лишь Квинке в 1861 г.¹. Для того чтобы сделать видимыми течения, вызванные в жидкости электричеством возле стенок твердых трубок, он применил мелкие крахмальные зерна; в результате своих опытов он дал удовлетворительное объяснение всех этих явлений. По его теории, жидкости, благодаря соприкосновению со стенками трубки, наэлектризовываются, и в зависимости от рода электричества они уносятся в направлении положительного или отрицательного тока; взвешенные в жидкости тельца в свою очередь наэлектризовываются жидкостью и вместе с нею уносятся электричеством. В конце своей работы Квинке говорит: «Нет ни единого факта, который противоречил бы объяснению переноса материальных частиц. Во всяком случае, из приведенных опытов следует, что движение материальных частиц под влиянием текущего электричества ни по своей величине, ни по своему направлению не зависит от агрегатного их состояния, а зависит от природы частиц и от природы тех веществ, с которыми они приходят в соприкосновение»². На тех же принципах Гельмгольц³ в 1879 г. построил математическую теорию этой *конвекции*. Но благодаря этому исследование непосредственного действия эфира на весомую материю здесь было снова удачно обойдено под тем предлогом, что в данном случае свободное электричество действует не на весомое вещество жидкости, а на заключающееся в нем и связанное с ним электричество. По мнению Эдлунда⁴, ему в 1866 г. удалось установить, что под влиянием тока *металлические проволоки удлиняются* независимо от вызываемого током нагревания, ибо, нагревая проволоку до одной и той же температуры один раз теплой водой, а другой — электрическим током, он нашел большее удлинение проволоки при нагревании током. Однако опыты других физиков указывают, что удлинения от тока могут быть приписаны все-таки косвенному действию теплоты и что неодинаковое действие тока и нагревающих жидкостей может быть объяснено неодинаковым внутренним распределением теплоты⁵. Все эти многообразные наблюдения связи между электрическими явлениями и молекулярными изменениями весомых тел позволяли думать, что всякое изменение в электрическом состоянии тел влечет за собою движение и перегруппировку их молекул и что, наоборот, все *изменения молекулярных движений вызывают и электрические действия*. Однако эти более общие представления о возбуждении электричества в свою очередь снова вызвали сомнение, является ли действительно *химическая теория* гальванического тока единственно возможной и нельзя ли источник электричества, возникающего при соприкосновении разнородных веществ, свести к другим причинам, и прежде

¹ „Pogg. Ann.“, СХІІІ, стр. 513, 1861.

² „Pogg. Ann.“, СХІІІ, стр. 598.

³ „Wiedem. Ann.“, VII, стр. 351, 1879.

⁴ „Pogg. Ann.“, СХХІХ, стр. 15, 1866; СХХХІ, стр. 337, 1867.

⁵ Например, Экснер („Pogg. Ann.“, доп. том VII, стр. 431), Р. Блондло („Comptes rendus“, LXXXVII, стр. 206) и др. Однако Эдлунд в 1876 г. вновь выступил в защиту своего мнения против всех возражений („Pogg. Ann.“, CLVIII, стр. 148).

ТЕРМИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ТОКОВ 409

всего к *тепловым различиям* между соприкасающимися веществами. Тогда *выравнивание этих различий при соприкосновении различных веществ можно было бы рассматривать как причину молекулярных изменений, обуславливающих электрические явления; возбужденное же электричество вызывает химические изменения тел, которые при благоприятных условиях со своей стороны дают теплоту, необходимую для получения длительных электрических токов.* И действительно, как раз такого рода теории электрического тока стали в это время отстаиваться с большой настойчивостью. Г. Гор¹ на основании многообразных опытов пришел к выводу, что возбуждение электричества при соприкосновении металлов с жидкостями происходит не столько вследствие химической, сколько в результате тепловой разности между ними. Бути², идя в том же направлении, показал, что две одинаковые металлические пластинки, погруженные в одну и ту же жидкость, части которой находятся при различных температурах, развивают электродвижущие силы. Наконец, Гоорвег³ в результате пространственных рассуждений пришел к следующим выводам: «Все гальванические токи являются термотокамаи; химическое действие в столбе и в аппаратах для разложения является следствием гальванического тока». Вслед за тем он пришел к такому общему заключению: «*Электричество от трения и давления имеет то же самое термическое происхождение, что и гальванический столб, т. е. соседние молекулы двух разнородных тел своими тепловыми движениями действуют друг на друга тормозящим образом; при этом часть тепловой энергии исчезает и взамен ее появляется эквивалентное количество электрической энергии ...*⁴. *Этой причины в то же время достаточно для объяснения всех случаев возникновения электричества. Нет основания считать источниками электричества ни испарение, ни растворение или отвердевание, ни дробление или толчение, ни осмос или капиллярность, ни горение или какое-либо иное химическое действие*⁵».

Перейдя в заключение к описанию *развития электрической техники*, мы остановимся на этом вопросе несколько подробнее, чем мы делали это прежде, когда касались технических отраслей знания, — с *одной стороны*, потому, что эта отрасль, начавшая отделяться от теории лишь в самое последнее время, в описываемый нами период находится еще в особенно тесной связи с теорией, — более тесной, чем в каком-либо другом отделе физики; с *другой же стороны*, — потому, что электротехника стремится занять совершенно особое положение, отличное от других отраслей техники.

Трудно установить, кто впервые применил слово «*электротехника*» и когда это случилось. Кармарш в своей «Истории технологии» 1872 г. еще не употребляет этого выражения, и его было бы бесполезно искать в лексиконах, появившихся в свет до 1880 г. Во всяком случае, восприимчиками при установлении этого наименования были —
Первая

¹ „Proc. of the Roy. Soc.“, XXVII, стр. 272, 1878; XXIX, стр. 472, 1879.

² „Comptes rendus“, LXXXIX, стр. 146, 1879; XC, стр. 917, 1880.

³ „Wiedem. Ann.“, IX, стр. 578, 1880. ⁴ Там же, XI, стр. 144.

⁵ Там же, XI, стр. 150.

410 ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

электрическая выставка в Париже 1881 г. и Конгресс электриков. Это слово не поддается легко определению и не исчерпывает всего вкладываемого в него содержания; согласно внешнему своему выражению электротехника обозначает только особую отрасль техники; но, с другой стороны, в настоящее время она стремится охватить *всю технику*, по крайней мере, в той мере, в какой электричество, проводя и преобразуя, должно играть роль честного посредника в игре сил. Что оно способно на такую посредническую роль, что оно в состоянии превращать движение, работу и силы, этого отрицать не приходится. Электричество легче поддается непосредственному *превращению* в другие физические силы, чем его великая соперница — теплота, и, кроме того, его легко *передавать* по любым направлениям на любые расстояния. Однако существование электротехники в указанном выше общем смысле зависит не только от этих свойств электричества, но, пожалуй, еще в большей мере от того, можно ли самое электричество, эту предпосылку всякой электротехники, иметь *везде, в любое время достаточной силы* и, наконец, *по сходной цене*. Открытые раньше других источники электричества оказались с обеих этих точек зрения непригодными для разрешения общей проблемы передачи сил. Вольтов столб и все вообще гальванические батареи, будучи пущены в ход, тотчас же начинают настолько ослабевать, что даже применение их для научных целей сопряжено с неудобствами и трудностями. Так называемые *постоянные* элементы, которые стали изготовлять начиная с тридцатых годов, вопреки своему названию, оказались тоже, — по крайней мере, когда от них требовались сильные действия, — настолько непостоянными, что один новейший автор счел возможным начать предисловие к своему сочинению о гальванических батареях следующими словами ¹: «Гальванические батареи! На губах современного электротехника появляется легкая усмешка при упоминании об этих источниках тока; они кажутся ему давно преодоленными болезнями детского возраста прикладного электричества». Тем не менее, эти гальванические элементы оказываются достаточными по своим действиям в отдельных отраслях техники, где применяются лишь слабые токи или где передача силы представляет собою не средство для какой-либо цели, а самоцель. Для *электрической телеграфии*, для *электрической сигнализации*, для *электрических регистрационных аппаратов* широко распространенные элементы Майдингера, изобретенные в 1859 г. ², а также марганцевые элементы, устроенные Лекланше ³ в половине 60-х годов, дают в течение более года токи достаточной силы и постоянства по сходной цене. Поэтому указанные выше отрасли электротехники, к которым мы еще прибавили *гальванопластику*, развивались независимо от общей проблемы электротехники и даже достигли значительного совершенства раньше, чем эта проблема была сознательно поставлена. К этим более старым отраслям в описывае-

¹ „Hartleben's elektro-techn. Bibliothek", т. IV: „Die galvanischen Elemente", стр. VII.

² H. Meidinger, Eine völlig constante Batterie, „Pogg. Ann.", CVIII, стр. 602, 1859.

³ Georges Leclanché (1839—1882) — химик в Париже.

ТЕЛЕФОН 411

мый нами последний период физики присоединились еще некоторые новые, вызванные устройством *телефона*. Поскольку последние оставались в теснейшей связи с развитием теоретической науки, мы на них здесь вкратце остановимся.

Первая попытка превращения электричества в звуки была сделана Пэджем¹ в 1837 г. Подвесив между коленами подковообразного магнита спираль из медной проволоки, он заставлял магнит звучать, замыкая или размыкая гальванический ток в спирали. В 1846 г. Вертгейм² нашел, что этот тон соответствует продольным колебаниям магнита и что он вызывается удлинением и укорочением, происходящими вследствие намагничивания. Кроме тона продольных колебаний и обычно крайне слабого тона поперечных колебаний, часто сопутствующего первому, Вертгейм заметил еще «своеобразный звон, как будто распространяющийся вдоль по проволоке, а также другие виды трудно определяемых шумов, причем последние особенно возникают в тех случаях, когда перерывы тока, а, следовательно, и толчки, следуют друг за другом более часто». В 1860 г. Ф. Рейс³ воспользовался этим звоном для устройства своего телефона. Аппаратом, *воспринимающим звук*, у него служил просто железный прут (вязальная спица) со спиральной обмоткой для тока, установленный на резонирующей подставке.

Передаточный аппарат состоял из *натянутой перепонки*, которая воспринимала звуки и при звуковом своем колебании замыкала и размыкала ток, идущий в звучащий аппарат. Этот прибор был продемонстрирован в декабре 1861 г. в заседании Франкфуртского физического общества, и сам Рейс сообщает следующее о действии его в «Ежегодном вестнике» («Jahresbericht») этого общества: «Что же касается действия телефона, то следует отметить, что при его помощи я имел возможность воспроизвести перед членами многочисленного собрания (Физического общества во Франкфурте на Майне) мелодии, которые напевали не очень громко при закрытых дверях в аппарат, помещенный в другом доме (на расстоянии около 100 м). Другие опыты показали, что звучащая палочка способна воспроизводить полные трезвучия фортепиано, когда телефон стоит на крышке инструмента; и, наконец, что телефон в состоянии воспроизводить звуки других инструментов, а именно, гармоники, кларнета, рожка, органных труб и т. д., если только издаваемые ими тоны лежат в определенных пределах, приблизительно от F до F ... До сих пор еще не было возможности воспроизвести с достаточной отчетливостью человеческую речь. Согласные передавались большею частью довольно отчет-

¹ Charles Page [(1812—1868), — служащий Патентного бюро в Вашингтоне], „Pogg. Ann.“, XLIII, стр. 411, 1838.

² „Pogg. Ann.“, LXXVII, стр. 43, 1849. Вертгейм применил для своих опытов прут из мягкого железа, вокруг которого он пропускал ток по спиральной обмотке. Одновременно тем же вопросом занимались еще и многие другие физики, как Делезенн, Марриан, Битсон, Вартман, де-ла-Рив, которые в большинстве случаев пришли к тем же результатам, что и Вертгейм.

³ Ph. Reis (1834—1874) — преподаватель Института Гарнье в Фридрихсдорфе возле Гамбурга.

412 МИКРОФОН

ливо, гласные же в меньшей мере»¹. Причина этого несовершенства заключалась, конечно, в приемной части прибора, железная палочка которого не была в состоянии воспроизвести тонких видоизменений колебаний. Поэтому, как сообщил в 1863 г. секретарь телеграфии Легат², Рейс коренным образом переделал приемную часть своего телефона, устроив ее таким образом, что звуки воспроизводились при помощи ударов маятникообразного якоря, подвешенного перед электромагнитом. Д-р Мессель, бывший ученик Рейса, свидетельствует, что этот новый аппарат передавал и слова яснее прежнего, хотя все-таки не вполне отчетливо. — Зачастую утверждают, что после этого телефон был совершенно предан забвению; однако, строго говоря, это неверно; напротив, этот прибор постоянно упоминался во многих учебниках и на лекциях и приводился как интересный пример многообразия в передаче электричества; не была лишь признана практическая полезность телефона, но это было до известной степени извинительно при тогдашнем несовершенстве этого прибора.

О том, что физики не переставали интересоваться этим прибором, свидетельствуют, во всяком случае, повторные попытки его усовершенствования. В ноябре 1865 г. С. Ятс производил опыты перед Дублинским физическим обществом с аппаратом, похожим на последний телефон Рейса, причем этот аппарат воспроизводил слова несколько отчетливее рейсовского. В 1870 г. Кромвелль Варлей в Лондоне применил для передачи тонов вибрирующие металлические язычки; Поль Лакур в Копенгагене применил для этой цели камертоны. В 1874 г. Эляйша Грей устроил в Чикаго передаточный аппарат, в котором посредине мембраны, воспринимающей произносимые слова, был прикреплен металлический штифтик, а прямо против него в очень плохо проводящей жидкости был установлен другой металлический штифт. В качестве приемного аппарата служила пластинка, притягивавшаяся электромагнитом. Но в 1876 г., когда Грей стал хлопотать о получении патента, Грэхем Белл уже получил патент на свой телефон, состоявший из двух совершенно одинаковых аппаратов, которые по своей идее были схожи с приемным аппаратом Грея³.

Мы не можем здесь следить за дальнейшим развитием телефонии, которая в скором времени получила большое распространение, и обратимся к рассмотрению других аппаратов, развитие которых было связано с развитием телефона. После того как Эдисон уже сделал⁴ попытку приспособить телефон для передачи слабых звуков на большие расстояния при помощи гальванических батарей, Давид Юз⁵ из Луизвилля воспользовался в 1878 г. идеей Эдисона для устройства *микрофона*. Всякое колебание в силе электрического тока, вызываемое в каком-либо месте проводки путем увеличения ее сопротивления, передается по всей цепи самим током. Следовательно, если бы в каком-

¹ „Jahresber. d. phys. Vereins zu Frankfurt“, 1860—1861 гг. Статья Рейса озаглавлена: „Über Telephonie durch den galvanischen Strom“ (стр. 57).

² „Dingl. polit. Journal“, CLXIX, стр. 23, 1863.

³ Graham Bell — в то время учитель школы глухонемых в Бостоне.

⁴ Thomas Alva Edison (1847—1931) — знаменитый изобретатель.

⁵ D. E. Hughes родился в 1831 г.) — изобретатель печатающего телеграф.

ЭДИСОН, ЮЗ И БЕЛЛ 413

нибудь месте цепи можно было вызвать колебания тока, соответствующие звуковым колебаниям, то сам ток передавал бы их телефону и они были бы там слышны с первоначальной силой. «Таким образом, — говорит Юз, — задача заключается в том, чтобы ввести в цепь электрического тока некоторое сопротивление, изменяющееся в точном соответствии со звуковыми колебаниями, так что по цепи пойдет волнообразный электрический ток, колебания которого по своей длине волны, высоте и форме явились бы точной копией звуковых колебаний». Эдисон был близок к разрешению этой проблемы, но и Юз, правда, лишь после ряда безуспешных попыток, нашел очень простое ее разрешение. Согласно сообщению Приса (в заседании Общества английских инженеров-телеграфистов 23 мая 1878 г.) Юз попытался достигнуть этой цели путем удлинения и укорочения самого провода, но безуспешно; однако, когда у него случайно оборвался провод и он слабо соединил концы его в месте разрыва, то заметил, что происходившие поблизости шумы стали передаваться в телефон. По-видимому, тогда он вспомнил о громких шумах, какими реагируют на звуки отдельные слабо укрепленные предметы, например оконные стекла, и это его навело на совершенно новую мысль усиливать предварительно с помощью резонанса передаваемые по телефону звуки. С этой целью он поместил на резонирующей подставке параллельно на расстоянии 1 мм друг от друга два проволочных штифта, соединенных проводящей связью с гальванической батареей, и соединил их металлически, положив на них поперек свободно еще один такой же штифт. Еще лучшие результаты дало следующее устройство: установив на резонирующей подставке вертикальную стенку, он укрепил на ней две маленькие пластинки из графита, к которым были присоединены провода от батареи, и между этими пластинками установил палочку из того же графита, так что она находилась с ними в слабой связи. Это устройство, будучи присоединено к телефону Белла, дало возможность воспроизводить не только звуки и слова, произносимые перед резонансным ящиком, но даже передавать такие слабые шумы, какие получались при проведении по резонатору волосяной кисточкой или при ползании по нему мухи. Одновременно с Юзом и Роберт Людтге в Берлине придумал свою конструкцию микрофона и в январе 1878 г. взял на нее патент. В своем описании, сделанном им при исходатайствовании патента, он дал характеристику своего прибора, который по идее оказался вполне схожим с юзовским: «Если в цепи батареи сделать перерыв тока, например, просто перерезать проволоку, и затем свободно приложить друг к другу оба конца разрыва, то ток, разумеется, окажется вновь замкнутым, но тогда на месте разрыва возникнет сопротивление, тем большее, чем слабее прижаты друг к другу поверхности разрыва. Если же одну из поверхностей разрыва установить таким образом, чтобы она приходила в звуковые колебания от звуков речи или от шумов, то она будет с различной силой прижиматься к другой соприкасающейся с ней поверхности — в соответствии с интенсивностью и формой отдельных колебаний. Таким образом, сопротивление в месте разрыва будет точно определяться интенсивностью, формой и числом звуковых колебаний, а вместе с ним будет

414 МИКРОТАЗИМЕТР. ИНДУКЦИОННЫЕ ВЕСЫ

изменяться и сила электрического тока... тогда введенный в эту цепь телефон Белла будет передавать в звуковой форме всякое усиление тока, соответствующее увеличению амплитуды звуковых колебаний» и т. д.

Так как всякое *изменение сопротивления* в цепи вызывает колебания тока, а при помощи включенного в цепь телефона оно выявляется в форме звука, то телефон стали применять и для измерения, или, по крайней мере, для сравнения *сопротивлений* в проводниках; а так как сопротивление изменяется и под влиянием *давления*, приложенного к некоторой части цепи, то по колебаниям силы тока можно судить о колебаниях давления, приложенного к определенным чувствительным частям цепи. Эдисон устроил для этой цели *микротазиметр* (в котором, однако, вместо телефона он для определения силы тока воспользовался зеркальным гальванометром Томсона), при помощи которого, по его словам, ему удавалось определять колебания воздушного давления в $\frac{1}{1\ 000\ 000}$ англ. дюйма. Этот прибор может служить также в качестве *термометра*, так как и теплота, подобно давлению, изменяет сопротивление, а вместе с тем и силу тока. Эдисон считает его более чувствительным, чем термостолбик Меллони, и рекомендует его мореплавателям в качестве средства для распознавания приближения ледяных гор, раньше чем они станут видимы на глаз.

Представим себе далее два деревянных полых цилиндра с двумя индукционными катушками на каждом из них, верхней и нижней, причем эти катушки навиты таким образом, что все индуцирующие действия цепи тока, в которую включены верхние катушки, полностью уничтожаются в цепи тока, в которую включены нижние катушки. Представим себе еще, что в цепь тока верхних катушек включены микрофон и непрерывно тикающие часы, а в цепь тока нижних катушек включен телефон; тогда при указанных выше нормальных условиях телефон будет совершенно бездействовать. Но если нарушить условия этого равновесия в одном из деревянных цилиндров, например, приблизив к нему или опустив в него кусок металла, то в телефоне тотчас же появятся звуки. На подобные сочетания катушек, которые нормально друг друга уравнивают, но при всяком незначительном изменении индукционных сил в одной из катушек дают индукционные токи, указывали уже Баббадж и Джон Гершель; а позднее Довэ устроил подобный прибор под названием «*дифференциального индуктора*». Однако незначительная чувствительность тогдашних гальванометров помешала широкому применению этого прибора; теперь же Юз в телефоне нашел хорошее средство для выявления возникающих здесь индукционных токов. Устроенный им прибор, который он назвал индукционными весами¹, до такой степени чувствителен, что он уже начинает звучать, когда в цилиндры кладут по золотой монете не вполне равного веса. Этот прибор рекомендуют для открытия подземных рудных залежей, а также металлических масс на дне моря; с помощью подобного же прибора, говорят, была обнаружена пуля в теле раненого президента Гарфильда.

¹ „Nature", XIX, стр. 77, 1879: „An induction-currents balance".

ФОТОФОН 415

Так как телефон выявляет малейшие *колебания силы тока*, а эти колебания могут быть вызваны *теплотой* и *светом*, то естественно было попытаться наладить телефонирование непосредственно с помощью световых и тепловых лучей, без всякой проволочной связи. Наиболее подходящей средой для превращения световых и тепловых лучей в колебания тока оказался *селен*. Этот открытый Берцелиусом в 1817 г. элемент считали непроводником электричества; но в 1837 г. Нокс установил, что селен становится проводником в то время, когда он плавится, а еще позднее, в 1851 г., Гитторф показал, что в одной из своих аллотропических модификаций, а именно — в кристаллическом виде, селен проводит электричество и при обыкновенной температуре¹. Расплавленный селен, будучи быстро охлажден, застывает в стекловидную массу, почти черную в отраженном свете и просвечивающую в тонких пластинках рубиновым цветом. При медленном же охлаждении он получает зернистое строение, имеет вид металла и совершенно непрозрачен для света, даже в тонких пластинках. В этом последнем виде он способен проводить электричество и при обычной температуре. Первое применение селена в электротехнике было сделано в 1873 г. электриком Уиллоуби Смитом в Лондоне; ввиду большого его сопротивления он применил его при испытании подводного кабеля. При этом помощник Смита Мей² открыл, что на свету сопротивление селена значительно меньше, чем в темноте, — при свете магниевой проволоки сопротивление селена уменьшалось вдвое. Это открытие было подтверждено многими физиками, как-то: Сэлом, Дрэпером, Адамсом, Сэбином, Вернером, Сименсом³ и др. Адамс⁴ нашел, что селен чувствителен даже к холодному свету луны. До этого времени опыты производились с помощью гальванометров. Но когда Белл попробовал определить изменения сопротивления с помощью телефона, ему пришла мысль, обратно, использовать это свойство селена для нужд телефонии. После многих тщетных попыток ему, при содействии его друга Семнера Тэнтера, сумевшего приготовить крайне чувствительные препараты селена, удалось, наконец, устроить фотофон, который он впервые описал 27 августа 1880 г. на заседании Американского общества распространения наук⁵. В наиболее удачной и простой форме передаточная часть этого аппарата состоит из плоского гибкого зеркала, например из посеребренной слюдяной пластинки, на заднюю поверхность которого падает звук человеческой

¹ „Pogg. Ann.“, LXXXIV, стр. 219, 1851

² Там же, CL, стр. 333.

³ „Там же, CLIX, стр. 117.

⁴ Там же, стр. 622.

⁵ „Das Photophon“, von A. G. Bell, немецкий перевод с английского, Leipzig 1880; „Jahrb. d. Erfind.“, XVII, стр. 90, 1881. Штейнгейль уже в 1838 г. в докладе, сделанном им на заседании Баварской академии, сказал следующее: „Дальнейшую возможность передавать мгновенные движения на большие расстояния без соединительных проводов представляет лучистая теплота, которая, будучи направлена с помощью собирательных зеркал на термоэлементы, возбуждает токи, которые со своей стороны могут вызвать отклонение магнитов“. („Über Telegraphie, insbesondere durch galvanische Kräfte“, стр. 10, München 1838; по „Jahrb. d. Erfind.“, XVII, стр. 136).

416 РАДИОФОНИЯ

речи. Если на этом зеркале сконцентрировать при помощи чечевицы сильный пучок солнечных лучей, то, отражаясь от его поверхности, этот пучок воспроизводит все колебания пластинки. Пропущенный через другую чечевицу, он превращается в пучок параллельных лучей, которые улавливаются на отдаленной станции при помощи параболического рефлектора, в фокусе которого находится чувствительная селеновая пластинка, входящая в состав местной батареи с телефоном. Было произведено множество опытов с передаточными и приемными приборами, которые были удалены друг от друга настолько, что звуки не были слышны непосредственно через воздух, например, на расстоянии 213 м. Подобными опытами было установлено, что для передачи раздельной речи достаточно друммондовского света и даже света керосиновой лампы. Для того чтобы определить природу лучей, действующих на селен, Белл поставил на пути прерывистого светового пучка различные поглощающие вещества. Раствор квасцов и сернистый углерод очень мало ослабили силу звука; раствор йода в сернистом углероде почти полностью уничтожил звук, во всяком случае, дал большее ослабление звука, чем совершенно непрозрачная на вид пластинка из гуттаперчи. «Хотя, таким образом, эти действия, — говорит Белл, — вызываются влиянием таких форм лучистой энергии, которые не воспринимаются нашим глазом, я, тем не менее, назвал прибор для приема и передачи звуков по этому методу «фотофоном», так как обычный луч света содержит в себе те лучи, которые в данном случае действуют. Кроме того, — говорит он далее, — мне пришла мысль, не может ли наше ухо услышать непосредственно, без помощи телефона, молекулярные колебания, вызываемые в кристаллическом селене действием прерывистого светового пучка. Было сделано много соответствующих опытов, но без решающего результата. Необычное действие гуттаперчевого экрана побудило нас испытать и его. Этот опыт привел к чрезвычайному результату. Я держал эту пластинку очень близко к уху, в то время как на ней при помощи чечевицы был сконцентрирован прерывистый пучок света, и я тотчас же ясно услышал музыкальную ноту. Это действие еще усилилось, когда мы установили каучуковую пластинку в виде диафрагмы и стали слушать ее с помощью слуховой трубки».

Последняя мысль дала толчок еще и к дальнейшим исследованиям. Белл и Тэнтер установили, что прерывистые лучи света, или — еще лучше — теплоты, заставляют звучать почти все твердые тела. Из жидкостей оказались способными звучать лишь очень немногие, а газы и пары (особенно нетеплопрозрачные), наоборот, очень легко начинают звучать под действием прерывистого света¹. Э. Меркадье предложил для такой передачи звуков название *термофония*, или еще общее *радиофония*. Белл, принявший это название, попытался, далее, показать применимость радиофонии к решению космических задач. Осенью 1880 г. он организовал в Медоне совместно с астрономом Янсенем опыты, имевшие своей целью выяснить, нельзя ли с помощью

¹ W. C. Röntgen, „Wiedem. Ann.“, XII, стр. 155, 1881; Tyndall, „Nature“, XXIII, стр. 374, 1880—1881 гг.

ПЕРЕДАЧА СИЛЫ 417

фотофона услышать могучие перевороты, происходящие в солнечной фотосфере, но пока безрезультатно. Еще меньше положительного можно, конечно, сообщить о предложенных проектах передачи при помощи токов и селеновых пластинок на любые расстояния световых изображений, получаемых с помощью волшебного фонаря.

После этих экскурсий вернемся к центральной проблеме электротехники — к проблеме общей *передачи и превращения силы*.

С исключением из проблемы передачи силы гальванических элементов было исключено и непосредственное использование химических сил для получения электричества. Таким образом, в настоящее время может идти речь только об использовании для этой цели *теплоты и механической силы*. Планов использования теплоты было не мало. Вплоть до новейшего времени было затрачено очень много усилий, чтобы устроить из различных металлов и металлических руд термоэлементы, которые давали бы постоянные и сильные токи. Маркус, Беккерель, Мюр и Кламон, Ноэ и другие достигли в этом отношении заслуживающих внимания результатов. Указывали также на то обстоятельство, что подобные батареи могут явиться давно уже искомыми двигателями для небольших производств; однако до сих пор эти термобатареи оказались все еще недостаточными для получения токов необходимой силы. Таким образом, для передачи силы остается только *получать электричество за счет механических сил*, или, что то же самое, добывать электричество при помощи *индукционных машин*. Однако наиболее сильные из этих машин — в том виде, как они до семидесятых годов применялись, главным образом, для электрического освещения, — неизменно обладают *двумя недостатками*, которые создают очень узкие пределы для их применения. С одной стороны, для увеличения набора магнитов, а, следовательно, для увеличения *силы* используемого магнетизма, существовал сравнительно узкий предел; с другой стороны, — электрические токи, даваемые этими машинами, по необходимости были лишены *равномерности*, так как эти токи слагались из индукционных толчков, которые с приближением полюсов электромагнитов к полюсам неподвижных магнитов нарастали до известного максимума, а затем снова гадали до известного минимума. *Первый недостаток принципиально более важен*, так как он основан на вторжении магнетизма в проблему электрической передачи силы; устранение его составляет бесспорную заслугу Вернера Сименса ¹. В апреле 1866 г. Уайльд в Манчестере устроил электрическую машину старого типа, но только неподвижные постоянные магниты он заменил гораздо сильнее действующим электромагнитом; последний получал магнетизм от второй меньшей магнитоэлектрической машины, для которой, естественно, были все-таки применены постоянные магниты. В том же 1866 г. Сименс на новой машине показал, что этот эффект может быть достигнут еще проще. Он совершенно удалил меньшую магнитоэлектрическую машину, которая должна была давать первое

¹ Ernst Werner Siemens (1816—1892), брат Вильгельма Сименса, с 1838 г. артиллерийский офицер; в 1850 г. он совместно с Гальске основал известную электротехническую фирму в Берлине.

418 ДИНАМОМАШИНА СИМЕНСА

возбуждение, соединил провода индуктора (так называется вращающийся электромагнит машины) с проводами неподвижного электромагнита и таким образом заставил ток, который мог возникнуть в индукторе, течь по обмоткам электромагнита, который тогда действительно становился магнитом. Сначала казалось необходимым перед применением этих машин пропускать через индуктор ток, взятый откуда-нибудь со стороны, но вскоре выяснилось, что в этом нет никакой надобности. Каждый сердечник из мягкого железа содержит в себе некоторый, хотя бы и слабый след магнетизма, который мог быть возбужден в нем каким-либо образом, земным ли магнетизмом, или же искусственно при помощи обтекавшего его тока. Этого следа магнетизма, однако, достаточно для того, чтобы при вращении индукторов вызывать в его проводах ток, хотя бы и слабый. При установке Сименса этот ток проходит и через обмотку неподвижного электромагнита, вследствие чего его магнитность несколько усиливается. Благодаря этому индукционные токи снова усиливаются и в свою очередь усиливают магнитность электромагнита; таким образом, происходит *теоретически неограниченное* взаимное усиление электромагнита и индукционных токов. Эту электромагнитную машину, из которой магнит был исключен, Сименс назвал динамоэлектрической машиной. Одновременно с Сименсом и, по-видимому, независимо от него к устройству подобных машин пришли Муррей, Варлей и Уитстон — явный признак того, что идея динамоэлектрического принципа не только уже носилась в воздухе, но и была уже оценена по достоинству. В пользу этого предположения говорит и тот факт, что уже в мае 1867 г. лондонский механик Лэдд экспонировал на Лондонской выставке машину, построенную по этому типу, но только снабженную двумя индукторами¹. Второй дефект динамоэлектрических машин — пульсирующий характер их тока, — Сименс тоже пытался устранить, а именно, еще

¹ Первые опыты со своей машиной „без постоянных стальных магнитов" В. Сименс произвел в присутствии нескольких ученых в декабре 1866 г.; в середине января 1867 г. он сделал сообщение о них в Берлинской академии наук. В начале февраля того же года брат его, Вильгельм, подал заявление в Королевское общество о предстоящем его сообщении на тему „О превращении механической силы в электричество без помощи постоянного магнита". После этого заявления, которое по правилам общества должно было быть подано за 14 дней до прочтения доклада, Уитстон тоже сделал заявку о своем докладе: „Об увеличении силы магнита путем вращения индуцируемых им самим токов" („Jahrb. d. Erfind.", IV, стр. 142, 1868). В сообщении Берлинской академии наук от 17 января 1867 г. („Monatsber. d. Berl. Akad.", стр. 55, 1867; „Pogg. Ann.", CXXX, стр. 332 и 517) Вернер Сименс говорит о своей машине: „В то время как действие магнитоэлектрических индукторов не возрастает пропорционально увеличению их размеров, в описанных мною машинах имеет место обратное отношение. Причина этого заключается в том, что сила стального магнита возрастает гораздо медленнее, чем масса примененной для его изготовления стали, и что сила большого количества малых магнитов не может быть сконцентрирована на маленькой площади без того, чтобы значительно ослабить их действие или даже в большой доле их размагнитить. Поэтому, когда требуется получение сильных постоянных токов, магнитные индукторы с стальными магнитами оказываются непригодными... Кроме того, стальные магниты быстро теряют большую часть своей магнитности и машины утрачивают свою первоначальную, силу" („Pogg. Ann.", CXXX, стр. 334).

МАШИНА ГРАММА 419

в 1855 г., но тогда еще с незначительным успехом ¹. Лучше удалось это Пачинотти, который избрал для этого более простой путь ²; однако устроенная им в 1860 г. небольшая машина была так слаба, что по существу она скорее являлась моделью, почему почти и не обратила на себя внимания. Лишь после того как Грамм в 1868 г. связал свою конструкцию (которую он изобрел независимо от Пачинотти) с динамоэлектрическим принципом Сименса, она очень быстро получила признание и вошла во всеобщее употребление.

Принципиально новым у Пачинотти и Грамма ³ было то, что индуктор вместо подковообразной имел кольцеобразную форму, а полюсы постоянного магнита, или заменяющего его электромагнита, имели полукольцевую форму, причем они возможно тесно охватывали кольцевой индуктор. Несмотря на такую конструкцию, кольцо Пачинотти или Грамма действует совершенно так же, как подковообразный магнит. Пока какая-либо часть проволочной катушки, намотанной на кольцо, перемещается в сфере действия одного из магнитных полюсов, по этой части катушки идет ток в некотором направлении; при переходе же ее в поле другого полюса ток меняет свое направление на противоположное. Поэтому в том месте, где магнитные поля обоих полюсов граничат друг с другом, ток с катушки отводится на ось кольца; служащую коллектором, откуда он переходит на неподвижный электромагнит и затем идет по внешней цепи. Проволоки, идущие от отдельных частей катушки кольца, кончаются на изолированных металлических накладках на его оси, и по ним же скользят в виде проволочных щеток концы тока, так что, несмотря на вращение оси, ток постоянно остается замкнутым. Так как кольцо сплошь обвито катушкой, то, если отвлечься от очень малых расстояний между отдельными ее витками, через каждое данное место магнитного поля проходят одинаковые витки и, таким образом, скользящие по коллектору щетки снимают равномерные токи и последние почти непрерывно, т. е. без пауз, протекают по внешней цепи. Однако и это кольцо может быть улучшено. Индукционные токи становятся тем сильнее, чем ближе электромагнит и индуктор противостоят друг другу и чем больше их противостоящие поверхности. Поэтому будет лучше, если кольцу Пачинотти вместо круглого сечения сообщить четырехугольное, или, еще лучше, если это кольцо вытянуть по направлению его оси таким образом, чтобы оно из кольца превратилось в полый цилиндр или в барабан. Конечно, при этом и электромагнит должен быть сделан более широким,

¹ Сименс говорит об этой машине („Wiedem. Ann.", XIV, стр. 472): „Подобная машина для получения непрерывных токов высокого напряжения для телеграфных нужд была выставлена в 1855 г. Сименсом и Гальске на Лондонской промышленной выставке и теперь находится в здешнем (Берлинском) почтовом музее... Кольцо Пачинотти имеет перед ней преимущество большей простоты, а также и то преимущество, что постепенно происходящая смена полюсов в железе связана с образованием меньшего количества теплоты".

² „Nuovo Cimento", XIX, стр. 378, 1865; по Wiedemann, „Lehrb. d. Elektricität", IV, стр. 372. — Antonio Pacinotti, жил во Флоренции.

³ „Comptes rendus", LXXIII, стр. 175, 1871; LXXV, стр. 1497, 1872. — Zénobe Théophile Gramme, сначала был модельщиком в обществе электрического освещения „Alliance".

420 ИНДУКТОР ГЕФНЕР-АЛЬТЕНЕКА

с тем, чтобы он своими полюсами возможно теснее охватил барабан. Подобный индуктор, в форме барабана, впервые в 1872 г. применил главный инженер завода Сименса Фр. ф. Гефнер-Альтенек¹.

Все новейшие машины, предназначенные для получения сильных электрических токов, сконструированы по этим двум типам машин — Грамма и Гефнер-Альтенека; все они построены по *принципу динамоэлектрических машин*; видоизменяются и совершенствуются лишь *формы их индукторов*².

Динамоэлектрические машины, подобно всем индукционным машинам, могут быть использованы двояко: либо для получения электрических токов при помощи механической работы, либо для получения механической работы при помощи электрических токов. Если привести

¹ По поводу этого усовершенствования Сименс говорит следующее („Wiedem. Ann.", XIV, стр. 473): „Электродинамической машине Грамма присущ еще тот недостаток, что в ней индуцирующему действию подвергаются лишь наружные части обмоток кольца, пробегающие в магнитном поле, тогда как внутренние половины остаются без действия и только бесполезно увеличивают сопротивление в цепи тока. Фон Гефнер-Альтенек в машине, названной его именем, в значительной мере устранил этот недостаток тем, что он расположил обмотку лишь на наружной стороне вращающегося кольца или массивного железного цилиндра, распределив ее, как и в машине Грамма, группами, сообщающимися с накладками и скользящими пружинами или щетками". Предвестником барабанного индуктора Альтенека был, вероятно, цилиндрический индуктор Сименса, описанный им еще в 1857 г. („Pogg. Ann.", CI, стр. 271).

² Раньше индукционных машин были усовершенствованы *электрофорные* машины. Вслед за изобретением электрофора Вольта Лихтенберг устроил двойной электрофор, состоявший из одного диска и двух смоляных кругов, из которых один заряжался от диска, наэлектризовывавшегося другим кругом; подобный прибор применял и Бэннет в качестве „удвоителя электричества". Кавалло установил смоляные круги вертикально и не прикладывал диска прямо к кругам, а перемещал его очень близко возле них при помощи вращающегося рычага; свой прибор он назвал мультипликатором („Gilb. Ann.", IX, стр. 139). Беннет и Кавалло тоже заметили, что их приборы (подобно позднейшим электрофорным машинам) наэлектризовываются сами собою, без предварительного сообщения им зарядов. Никольсон устроил электрофорные пластины из стекла, обложив их частично серебром, а подвижную пластинку с рукояткой он присоединил к вращающейся оси („Gilb. Ann.", IX, стр. 145). Этот аппарат, названный им „Revolving doubler" (вращающийся удвоитель), действовал интенсивнее прежних и сначала возбудил большой интерес, однако в связи с поразительным в то время развитием гальванического электричества он скоро был предан забвению. Столь же мало обратил на себя внимания схожий с ним прибор Белли, который был им устроен в 1831 г. („Annali dl Scienze del reg. Lomb. Venet.", стр. 11, 1831; Albrecht, „Gesch. d. Elektr.", стр. 53). Лишь после того как Фарадей своей теорией статической индукции снова обратил внимание физиков на эту область, электрофорные машины стали очень быстро совершенствоваться. Первую из подобных машин описал Теплер (профессор в Дерпте, потом в Дрездене) в 1865 г. („Pogg. Ann.", CXXV, стр. 469; „Rigaer Zeitung", 7 янв. 1865). Независимо от него и почти одновременно с ним А. Гольц (родился в 1836 г., профессор в Грейфсвальде) устроил более простую по своей конструкции, но в то же время и более сильную машину („Pogg. Ann.", CXXVI, стр. 157). Теплер в 1867 г. заявил („Pogg. Ann.", CXXVII, стр. 178), что „электрофорная машина представляет собою, пожалуй, наиболее прямой путь для получения электрических действий за счет механической работы". В 1869 г. Поггендорф („Pogg. Ann.", CXXXIX, стр. 513) осуществил с помощью машин Гольца такие же передачи сил, какие теперь выполняются при посредстве соединенных динамо-машин.

ИНДУКЦИОННЫЕ МАШИНЫ 421

во вращение индуктор машины, то по проволочной цепи последней пойдет электрический ток; если же, наоборот, через проволочную сеть цепи машины пропустить электрический ток, то индуктор начнет вращаться, а с его оси движение может быть передано на любую рабочую машину.

Этим теоретически проблема *передачи силы* при посредстве электричества разрешается полностью. В самом деле, если в каком-либо месте имеется в нашем распоряжении механическая сила, которую требуется использовать для работы в другом месте, то стоит лишь установить в первом месте динамо-машину, дающую при посредстве механической силы электрический ток, и отвести последний во второе место, заставляя его там приводить в движение другую динамо-машину, аналогичную первой. Однако на практике возможность осуществления такой передачи целиком зависит от *потерь силы*, которые при этом неизбежны. По этому поводу Вернер Сименс в упомянутой выше статье говорит следующее¹: «Если две динамоэлектрические машины ввести в одну и ту же цепь и одну из машин вращать с постоянной скоростью, то другая, в качестве электромагнитной машины, должна вращаться в противоположном направлении; это следует уже из того соображения, что динамоэлектрическая машина представляет собою электромагнитную машину, вращаемую в противоположном направлении. Встречный ток, который дает эта машина, вращаемая током, ослабляет ток первичной динамо-машины и вместе с тем уменьшает работу, необходимую для ее вращения. Если бы вторичная машина не должна была выполнять ни внешней, ни внутренней работы, то скорость ее вращения дошла бы до того, что ее электродвижущая сила уравновесила бы электродвижущую силу первичной машины. Тогда в цепи не было бы никакого тока, но и никакой бы работы не затрачивалось и не производилось. Однако в полном объеме такое состояние равновесия никогда не может быть достигнуто, так как вторичной машине приходится преодолевать внутренние сопротивления, а первичной необходимо достичь известной скорости, зависящей от ее конструкции, прежде чем в ней начнется динамоэлектрический процесс усиления тока. Если же вторичная машина производит какую-либо работу, то скорость ее уменьшается; вместе с ней ослабевает и зависящий от скорости ее вращения встречный ток. В этом случае по цепи обеих машин протекает ток, соответствующий разности их электрических токов, для получения которого затрачивается известная сила и который со своей стороны выполняет работу, возложенную на вторичную машину. Я уже в других местах указал, что полученный при этой передаче силы полезный эффект не является постоянной величиной, а зависит от отношения скоростей обеих машин, и что он возрастает с увеличением скорости их вращения. Описанное ниже исследование в известных пределах подтвердило это заключение. На практике до сих пор достигнут полезный эффект до 60% затраченной работы, а наибольшие из находящихся ныне в эксплуатации машин, — построенных, правда, для нужд освещения, а не специально для передачи силы, —

¹ „Wiedem. Ann.“, XIV, стр. 473—479, 1881.

422 ПОТЕРЯ СИЛ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧЕ СИЛЫ

передают до 10 л. с. (измеренных нажимом Прони), со средним коэффициентом полезного действия в 50%. Следовательно, при электрической передаче силы полезная работа до сих пор составляет лишь половину затраченной работы, другая же половина идет на преодоление сопротивлений в машине и проводнике и превращается в теплоту. Размеры этих потерь, конечно, зависят от устройства машины. Если бы не было надежды существенно сократить эти потери путем улучшения конструкции машин, то применение электрической передачи оставалось бы до известной степени ограниченным. Поэтому очень важно определить причины этих потерь, зависящие от конструкции машин, и обсудить, нельзя ли, и какими именно путями, добиться полного или частичного устранения этих источников потерь. Чисто механические источники потерь, как трение, сопротивление воздуха, толчки и пр., можно при этом оставить без внимания, так как вызываемая ими часть потерь невелика и эти дефекты могут быть устранены известными конструктивными приемами. Важной физической причиной потерь, которая полностью никогда не может быть устранена, является нагревание проводов электрическим током... Этим же причинам следует приписать и то бросающееся в глаза обстоятельство, что после окончания процесса нарастания сила тока динамо-машины, замкнутой самое на себя, почти пропорциональна скорости вращения, тогда как согласно динамоэлектрическому принципу (т. е. если не принимать в расчет нагревания проводов, вторичного действия индукционных токов и пр.) она при любой скорости вращения должна была бы возрасти до одной и той же бесконечной величины, если магнетизм пропорционален силе тока. Можно ли и в какой мере добиться устранения указанных дефектов путем улучшения конструкции динамоэлектрических машин, теоретически решить невозможно».

Долгое время надежды возлагались на другой способ передачи силы, сводившийся, впрочем, больше к накоплению, или концентрированию ее, с последующим уже затем ее использованием. Если в стеклянный сосуд со слабым раствором серной кислоты погрузить две свинцовые пластины и присоединить их к полюсным проводам динамоэлектрической машины, то, как только машина начнет работать, свинцовые пластины начинают под влиянием химического действия тока изменяться. Пластина, в которую поступает положительный ток, постепенно покрывается бурым налетом, состоящим из порошкообразного соединения свинца, так называемой перекиси свинца, а поверхность другой приобретает серый, зернистый, чисто металлический вид. Разобшив пластины с машиной, их можно сохранить в течение долгого времени, причем их поверхности не изменяются. Но если в любое время их соединить проводом, подобно полюсам элемента, то химический налет на пластине начинает постепенно исчезать, пластины становятся снова одинаковыми, освобождающаяся при этом химическая сила снова превращается в электричество, из которого она произошла, и по проводу идет ток; последний, правда, длится более короткое время, чем первоначальный ток, с помощью которого была произведена зарядка, но зато он обладает большей электродвижущей силой. Ознакомление с такого рода действиями электричества началось с упо-

АККУМУЛЯТОРЫ 423

мянутого раньше Риттера, а именно с 1802 г., и с тех пор многократно конструировались так называемые вторичные элементы, теория которых, как сказано, была удовлетворительно разработана еще до Шенбейна. Мысль о сообщении пластинам целесообразной, т. е. спиралевидной, формы, с тем, чтобы в небольших сосудах помещались возможно большие поверхности, — принадлежит Планте¹ (1860 г.); но только после того как Камилл Фор² улучшил или только изменил эти вторичные элементы, или аккумуляторы, последние привлекли к себе соответствующее внимание. Однако вызванный ими энтузиазм и оптимистические ожидания, что при их помощи будет разрешена проблема дробления электричества на мелкие части и его транспортирования в любом направлении, надежды, что «электричество можно будет продавать в банках, подобно помаде» — ныне уже испарились. Конечно, теоретически, аккумуляторы обещают более общее решение вопроса о передаче силы, чем динамо-машины, так как они дают возможность перемещения не только в пространстве, но и во времени. Однако с точки зрения первой щели они, требуя для перемещения вследствие значительной своей тяжести опять-таки значительной затраты силы, определенно уступают динамо-машинам, не говоря уже о том, что и без того потери сил в аккумуляторах не меньше, чем в динамо-машинах. Что же касается переноса силы во время, то, хотя динамо-машина и не может конкурировать с ними в этом отношении, аккумуляторы все же обладают тем недостатком, что их действие очень непродолжительно и не превышает нескольких дней. Поэтому и для данной цели их можно применять лишь в тех случаях, когда имеют дело с непостоянно действующими силами, или с источниками сил, величина которых во время работы сильно изменяется. Если, таким образом, приходится признать, что проблема электрической передачи силы не только настоящим образом не разрешена, но находится еще лишь в начальной стадии своего разрешения, то естественно возникает вопрос: каким же образом электротехника уже теперь могла достичь столь быстрого развития и всеобщего признания, если достижение истинных ее целей еще так далеко. Причиной этого является один вид превращения сил, а именно, превращение электричества в свет, и этот вид превращения силы еще долго будет служить стимулом и практическим моментом в общей проблеме передачи силы. Но, с другой стороны, весь ход развития техники превращения электричества в свет, — с тех пор как узнали световую дугу Дэви и накаливание осветительных проволок, так далеко отошел от теории и до такой степени стал делом техники, что входить здесь в дальнейшее его описание нам не приходится. Остается еще упомянуть только об одной стороне данного вопроса. *Существенную особенность электричества составляет его неограниченность в пространстве, по крайней мере, в земном. При его посредстве человек непосредственно слышит, говорит и осязает на*

¹ Gaston Planté (1834—1889) — ученик А. Беккереля; „Comptes rendus“, стр. 640, 1860; „Pogg. Ann.“, CIX, стр. 655.

² „Comptes rendus“, XCII, стр. 951, 1882.

424 ЦЕЛИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

самых далеких расстояниях, он безошибочно развивает на любых расстояниях большие силы и производит тяжелые работы. Более того, если наше обоняние и вкус вызываются особыми движениями материи, воздействующей на наши органы чувств, то нет никаких непреодолимых препятствий к тому, чтобы и эти ощущения могли передаваться на расстояние при помощи электричества. Таким образом, электричество конкурирует со столь родственным ему светом и дает человеку основания надеяться, что, освобождаясь все больше и больше от пространственных границ, он, в конце концов, сможет приблизиться, по меньшей мере, к земному вездесущию. Но независимость от пространственных границ всегда в известном смысле обуславливает и независимость от течения времени; таким образом, непрерывный процесс техники, идущий параллельно развитию науки, приводит к безграничному росту господства человека над природой и всеми ее стихиями, а вместе с тем и гарантирует человеческому роду неизменное движение вперед на пути к все большему его совершенству.

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ 425

КО ВСЕМ ТРЕМ ЧАСТЯМ „Истории физики“ Ф. РОЗЕНБЕРГЕРА

Римские цифры обозначают номера частей (III¹ — первый выпуск III части, III² — второй выпуск той же части). Знак * возле арабской цифры указывает на наличие на соответствующей странице биографических сведений. Кроме того, в самый указатель введены дополнительные биографические данные, имеющиеся в указателе к немецкому изданию настоящей работы Ф. Розенбергера. Для иностранных имен приведены оригинальные транскрипции.

- Аббади (d'Abbadie M.), III², 104
Аббе (Abbe E.), III², 350, 351*
Аббот Л. (Abbot L. H.), III², 280
Абриа (Abria), III², 397
Август (August E. T.), III¹, 224; III², 72
Августин (Augustinus), I, 74
Аверани (Averani G.), II, 243
Аверроэс (Averroes), I, 94*—95*, 108, 109
Авиценна (Avicenna), I, 87*—88, 91
Авогадро (Avogadro A.) (1776—1856, Турин), III², 207, 222
Агвилониус (Agvilonius Fr.), II, 89*
Адамс (Adams W. G.) III², 415
Аджунти (Aggiunti N.), II, 175*
Акин (Akin C. K.), III², 142
Аккерман (Ackermann J. F.), III¹, 93
д'Аламбер (D'Alembert), III¹, 97, 206, 243; III², 51, 59
Алексеев В. Ф., III², 271
д'Алибар (D'Alibard), II, 294
Альбаттани (Albategnius или Albattâni), I, 85*—86, 93
Альберт Великий (Albertus Magnus), I, 88, 99—102, 100*, 107
Альбируни (Albiruni), I, 91*, 93
Альбрехт (Albrecht), III¹, 196, 204, 283, 285
Альгазен (Alhazen), I, 88—90*, 94, 105—107; II, 72
Альгацини (Alkhazini), I, 90—94*
Альгевер (Algöwer), II, 210
Альдини (Aldini „G“; 1762—1834, проф. физики в Болонье), III¹, 92, 189
Аль-Мамун (Almamûn), I, 85*
Альтгауз (Althaus), III¹, 198
Альхайтам (Alhatham), I, 90*, 92, 94
Амага (Amagat E. H.), III², 297
Амичи (Amici G. B.), III², 340*, 350
Амонтон (Amontons G.), II, 179, 247*—249, 325; III¹, 105
Ампер (Ampère A. M.), III¹, 24, 170, 180, 193*—200, 211, 220, 255, 256, 258, 261, 283, 284; III², 7, 161—167, 169, 171, 179, 181, 183, 195, 200
Анаксагор (Anaxagoras), I, 17, 21, 38*—41
Анаксимандр (Anaximander) I, 19, 35*
Ангстрем (Angström A. J.), III, 208; III², 147, 148, 305, 329*, 332, 334—336
Андерсон А. (Anderssohn A.), III², 233

426 ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Андерсон (Anderson Robert), II, 280
Андроник (Andronicus v. Rhodos), I, 44
Ансельм Кентерберийский (Anselm v. Canterbury), I, 96
Анстис (Anstice R.), III², 108
Антемий (Anthemius), I, 76, 77*
Антинори (Antinori V.), III¹, 201, 257; III², 107
Араго (Arago D. F. J.), III¹, 147, 153*—156, 170, 175, 178—180, 182, 192—193, 199, 211, 233, 235, 254, 286, 291; III², 112, 126, 133—135
Аристарх Самосский (Aristarch), I, 55*, 59, 62, 63, 73, 120
Аристотель (Aristoteles), I, 17, 22, 23, 32, 34, 37, 38, 40, 42—52, 43*, 60, 64, 66, 68, 70, 71, 77, 79, 83, 94, 95, 97, 98, 107, 109, 113, 115, 121, 122, 125, 126, 141, 143; III¹, 21, 170, 240
Аристофан (Aristophanes), I, 65
Армстронг (Armstrong W. G.), III¹, 275
Архимед (Archimedes), I, 18, 24, 25, 52, 56*—58, 60—62, 70, 71, 74—76, 91, 94, 130, 131
Архит (Archytas), I, 18, 42*, 52
Атвуд (Atwood G.), III¹, 102*
Ауэрбах Ф. (Auerbach F.), III², 359* 368
Ахард (Achard Fr. C.), III¹, 95, 115
Ахария Баскар (Acharya Bhaskara), III², 123
Аш Эд. (Ash E., врач в Лондоне, умер в 1829 г.), III¹, 93
Баадер (Baader Jos., 1763—1835, Мюнхен), III¹, 239
Баббадж (Babbage Ch., 1792—1871, математик в Лондоне), III¹, 199; III², 414
Бабине Ж. (Babinet J.), III¹, 82, 187*, 193; III², 153
Бабо (Babo V.), III², 282
Баден-Поуэль, см. Поуэль-Баден Балдуин (Balduin Ch. Ad.), II, 139*
Банкалари (Bancalari M. Al.), III¹, 278
Банкс (Banks I.), III¹, 117, 118
Баретт (Barett W. E.), III², 67, 370
Баркер (Barker), II, 318
Барлоу (Barlow W. H.), III², 181
Барроу И. (Barrow I.), II, 133, 142, 192, 243
Барсанти (Barsanti Eug., умер в 1864 г.), III², 97
Бартолинус (Bartholinus E.), II, 155, 239, 240
Батчельдер (Batchelder I. M.), III², 406
Баумгартнер (Baumgartner A., 1793—1865, президент Венской акад.), III¹, 224; III², 59
Баумгауер (Baumhauer H., 1821—1885, Голландия), III², 272
Бауш (Bausch J. L.), II, 152
Бевис (Bewis), II, 289
Беер А. (Beer Aug.), III², 128, 130, 133*, 134
Беетц В. (Beetz W.), III¹, 269; III², 156, 182, 183*, 306, 366
Бейс-Баллот (Buys-Ballot Ch. H. D.), III¹, 115, 144, 191*, 199, 214
Беккария (Beccaria G. B.), II, 284, 295*, 327; III¹, 94
Беккерель Ан. (Bequerel Ant. C.), III¹, 262, 266*, 268, 277, 292; III², 177
Беккерель Эдм. (Bequerel Al. Edm.), III¹, 201, 276; III², 136*—138, 140, 149, 180, 417
Бели Ф. (Baily Fr., 1774—1844, биржевой маклер в Лондоне), III², 101
Белл (Bell G.), III², 373, 412*, 413—416
Беллани (Bellani A., 1776—1867), III¹, 238

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ 427

- Беллармин (Bellarmin), II, 87, 110
Беллавитис (Bellavitis G., 1803—1880), III², 108
Беллати (Bellati), III², 306
Белли Д. (Belli G., 1791—1860, проф. физики в Павии), III², 191, 420
Бенедетти (Benedetti), I, 116, 132*—133; II, 49, 54, 59
Беннет (Bennet Abr., 1750—1799, английский пастор), II, 328; III², 420
Бенценберг (Benzenberg J. Fr.), III¹, 102*, 112, 134, 136; III², 101—103
Берар (Berard J. Et.), III¹, 212*—213, 221, 292; III², 19, 63, 79, 94
Бергер И. (Berger Jos.), III², 75*
Бергман (Bergmann O. T.), II, 305*, 306
Бергнер А. (Bergner A.), III², 316
Беренс (Behrens G. V., 1775—1813), III¹, 266
Беригард (Berigard Cl.), II, 110*
Бернар (Bernard F.), III², 369
Бернулли Даниил (Bernoulli Dan.), II, 258, 272*, 274, 276, 277, 279, 281—282, 316, 322, 323, 325, 326; III¹, 128—129, 133; III²—78, 285
Бернулли Иоганн (Bernoulli Johann), II, 41, 227, 237, 243, 244, 251—252, 260—264, 262*, 274, 276, 280
Бернулли Николай (Bernoulli Nicolaus), II, 263
Бернулли Яков (Bernoulli Jacob), II, 205, 227, 237, 243, 260*—262, 274
Бертело М. (Berthelot M. P. E.), III², 70*, 126
Бертолле (Bertollet Cl. L., 1748—1822, проф. химии в Париже), III¹, 70, 74, 100, 106, 112; III², 51
Бертольд (Berthold G.), III², 14, 316
Бертрам Г. (Bertram H.), III², 105
Бертран А. (Bertrand A.), III², 122
Бертран Ж. (Bertrand J.), III², 381
Бертус (Bertus K.), II, 161
Берцелиус (Berzelius J. J.), III¹, 26, 114, 123—124*, 169—170, 203, 210, 218, 223, 237—238, 259, 261, 265—267, 293; III², 11, 74, 121, 415
Бертье Ж. Э. (Bertier J. E., 1710—1783, духовное лицо во Франции), II, 296; III², 314
Бессель (Bessel Fr. W., 1784—1846), III¹, 100
Бетанкур (Betancourt Aug.), III¹, 108*
Беттгер Р. (Böttger, R.), III¹, 276*, 283; III², 183
Бетти (Betti), III², 395
Бецольд В. (Bezold W.), III², 279*
Бикер (Bicker L., 1731—1801, врач в Роттердаме), III¹, 109
Бина (Bina A.), II, 284
Био (Blot J. V.) III¹, 33, 65, 80, 104, 109—110, 112, 114, 116—118, 127, 135, 150, 153—156*, 173, 175—178, 181, 182, 185, 193, 194, 197, 198, 207, 213, 247, 287, 292; III², 68, 72, 133, 135
Битсон (Beatson), III², 411
Блондель (Blondel Fr.), II, 280
Блондло Р. (Blondlot R.), III², 408
Блэк (Black J.), II, 318*—319, 324, III¹, 83
Бодримон (Baudrimont Al. Ed., 1806—1880, проф. химии в Бордо), III², 74

428 ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Бозе (Bose G. M.), II, 286*, 290
 Бойль Р. (Boyle Rob.), II, 45, 140, 150, 151, 165*—170, 176, 193, 194, 206, 208, 209, 210, 238; III¹, 32, 70; III², 138, 290
 Боккачио (Boccaccio) I, 109
 Больцано Б. (Bolzano V., 1781—1848), III², 144
 Больцман Л. (Boltzmann L.), II, 18; III², 87*, 88, 90, 212, 219, 260, 311
 Бон К. (Bohn C.), III², 142, 143
 Бонд (Bond), II, 301
 Боненбергер (Bohnenberger, J. G. Fr., 1765—1831, проф. математики и астрономии в Тюбингене), III¹, 224; III², 109
 Бонн (Bonnet R., 1727—1795, проф. математики в Париже), III¹, 100, 105
 Борда (Borda J. Ch.), II, 281*—282; III¹, 100
 Борелли (Borelli G. A.), II, 21, 153, 171, 174*—176, 220
 Борель П. (Borel P.), II, 75, 243*
 Боскович (Boscovich R. J.), II, 31, 306—308, 307*; III¹, 34; III², 191, 199, 200
 Босша И. (Bosscha J.), III², 378
 Ботто (Botto G. D.), III¹, 259
 Боэций (Boëtius), I, 76*
 Бравэ (Bravais Aug., 1811—1863, проф. физики в Париже), III², 108
 Брайлей (Bradley J.), II, 212*, 265
 Брайт (Bright Ch.), III², 177
 Брайтон (Brighton H.), II, 256
 Брама (Brahma J.), III¹, 103
 Бранд (Brand), II, 139
 Брандес (Brandes H. W., 1777—1834, проф. физики в Лейпциге), III¹, 104, 174
 Брандт (Brandt S.), III², 354, 355
 Браун (Braun F.), III², 261*
 Брегэ (Breguet L. Fr.), III¹, 214; III², 134, 366*
 Брезина (Bresina), III², 371*
 Брио (Briot Al., 1817—1882, проф. математики и физики в Сорбонне), III¹, 286
 Бриссон (Brisson M. J., 1723—1806, проф. физики в Париже), III¹, 94, 100
 Броун Р. (Brown R., 1773—1858, хранитель Британского музея), III², 278
 Броункер (Brounker W.), II, 151
 Бругманс (Brugghans S. J., 1763—1819, проф. в Лейдене), III¹, 276, 277
 Брукгем (Brougham H.), III¹, 147*
 Бруннер (Brunner C. Em.), III¹, 224; III², 115*, 116
 Бруно Дж. (Bruno Giord.), I, 140*, 141
 Брюке Эр. В. (Brücke E. W.), III², 150—154, 152*, 276
 Брюстер Д. (Brewster D.), III¹, 148, 155*, 156, 181, 183, 259, 288—289, 291, 293; III², 129, 133, 139—141, 145, 146, 153
 Буажиро (Voisgiraut Thom.), III¹, 192
 Буа-Реймон П. дю (Bois-Reymond, Paul du), III², 123*, 124, 284
 Буа-Реймон Эм. дю (Bois-Reymond Emile H. du), III², 179*
 Буге (Bouguer P.), II, 275, 299*—300, 301, 302, 322; III², 314
 Бузольт (Busolt), III¹, 293
 Буллиальд (Bullialdus I.), II, 220

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ 429

- Бультон (Boulton), II, 325
 Бунзен Р. (Bunsen R.), III¹, 238; III², 119, 122, 146, 149, 269*—271, 286, 322, 324—329
 Бунт Т. (Bunt T. G.), III², 108
 Буоно (Buono C.), II, 171*
 Бургэ Ж. (Bourguet J.), III², 369
 Бисинеск (Boussinesq) III¹, 287; III², 344
 Буссе Ф. (Busse Fr. G., 1756—1835, проф. во Фрейберге), III¹, 139; III², 364
 Бутти (Bouty E.), III², 409
 Бутиньи (Boutigny P. H.), III², 74*, 75
 Буфф Г. (Buff H., 1805—1878, проф. физики в Гиссене), III², 67, 75, 177
 Бушепорн Ф. (Boucheport F. de), III², 226
 Бьеркнес К. А. (Bjerknes C. A.), III², 404*—405
 Бэкон Р. (Bacon Roger), I, 83, 102—107, 103*; II, 74, 214
 Бэкон Фр. (Bacon Fr. of Verulam), I, 43, 104; II, 7, 8—9, 10, 19, 40, 45, 46, 95*—108, 116, 139, 148, 153, 194, 216, 229; III¹, 28
 Бэли (Baily Fr., 1774—1844, биржевой маклер в Лондоне), III¹, 137; III², 101
 Бюльфингер (Bülfinger G. B., 1693—1750, теолог в Тюбингене), III¹, 104
 Бюрги (Bürgi J.), II, 183, 184—185*
 Бюффон (Buffon G. L. L.), II, 277*—278, 294; III¹, 70, 115
 Ваальс ван-дер (Waals J. D. van der), III², 221, 222, 291, 293
 Вагнер (Wagner J. P.), III¹, 260*
 Вайделе (Waidele Er.), III², 121, 276
 Валли (Valli E.), III¹, 89, 92
 Валлис (Wallis J.), II, 151, 180*—182, 220, 253, 259
 Валь (Wall), II, 251
 Вальтер (Walther B.), I, 112*—113
 Ванд Т. (Wand Th.), III², 85
 Вандермонд (Vandermonde, Ch. A., 1735—1796, Париж), III¹, 100, 106
 Варбург (Warburg E.), III², 282—284*, 302, 310, 313, 373
 Варен (Varin), II, 230
 Вариньон (Varignon P.), II, 233*
 Варлей (Varley Cr. Fl., 1828—1883, английский электрик), III², 177, 412, 418
 Вартман (Wartmann E. F., 1817—1886, проф. физики в Женеве), III², 108, 155, 411
 Вебер В. (Weber W.), III¹, 131, 171, 240*—249, 254, 262, 278, 284; III², 13, 43, 44, 155, 157, 159, 161—163, 166, 170—176, 183, 201, 248, 258, 259, 261, 275, 365, 374, 380—386, 390, 391, 394
 Вебер Г. (Weber G., 1779—1839, юрист в Дармштадте), III¹, 247
 Вебер Г. Фр. (Weber H. Fr.), III¹, 208; III², 268, 278, 305*, 307
 Вебер Р. (Weber Rob.), III², 362
 Вебер Э. (Weber E. Fr.), III¹, 240*
 Вебер Э. Г. (Weber E. H.), III², 172, 240*—249, 279
 Веджвуд (Wedgwood J.), II, 302*; III¹, 291
 Вейгель (Weigel E.), II, 246
 Вейраух (Weyrauch J. J.), III², 44*
 Вейсбах (Weisbach J.), III², 280*, 281
 Вейсс (Weiss E.), III², 370*

430 ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Велькер Г. (Welcker H.), III², 151
Вельтер (Welter), III¹, 224
Вентан (Ventan), III¹, 138
Вентури (Venturi G. B., 1746—1822, Италия), III², 215, 285
Вердè (Verdet M. E., 1824—1866, проф. физики в Париже), III¹, 147, 179—181, 286; III², 52, 57
Вертгейм В. (Wertheim W.), III¹, 234; III², 127*, 128, 181, 182, 258, 273, 274, 365, 411
Вивиани (Viviani V.), II, 53, 112, 118, 171*, 174, 184; III², 107
Видеман Г. (Wiedemann G.), III², 188, 208, 209, 259, 263, 277; III², 182*, 183, 262, 398, 402, 405, 407
Видеман Э. (Wiedemann E.), I, 84, 89, 90, 94; III², 314*, 397, 402
Вик Г. (Wyk H.), I, 109
Виллари (Villari E.), III², 302
Виллемо (Villemot Ph.), II, 265
Виллиген ван-дер (Willigen V. S. M. van der), III³, 108
Виллис Р. (Willis R.), III², 357*
Вильгельми Л. (Wilhelmy L. F.), III¹, 210; III², 203*—205, 206, 273—275
Вильд Г. (Wild H.), III², 67, 346
Вильде (Wilde), I, 30
Вильке (Wilke J. C.), II, 302, 303*, 304—305, 306, 319, 320, 327; III¹, 94
Вилькиисон (Wilkinson), III¹, 126* Винер (Wiener L. Chr.), III², 278*, 279
Винкельман (Winkelmann A.), III², 305*, 307, 310, 312
Винклер (Winkler J. H.), II, 286*, 287, 291, 294
Виоль (Violle J.), III², 264
Вителло (Vitello) I, 107*
Витрувий (Vitruv), I, 53, 64, 65
Вокансон (Vaucanson J. de), II, 214*
Вокелен (Vauquelin L. N., 1763—1829, Париж), III¹, 122, 126
Волластон (Wollaston), II, 301
Вольпичелли (Volpicelli P.), III², 300*, 406
Вольт (Volta, A.), II, 327*, 328, 330; III¹, 89—93, 116—118, 121, 200, 265; III², 121, 180
Вольтер (Voltaire), II, 236, 244, 276
Вольф (Wolf R.), род. в 1816 г., астроном в Цюрихе), I, 30, III², 115, 181, 287
Вольф Хр. (Wolf Chr.), II, 215, 213, 219, 224, 251, 253, 266, 267, 268
Вольферс (Wolfers J.) II, 237
Вреде (Wrede F.), III¹, 239, 291
Врен (Wren Ch.), II, 151, 180*, 181, 182, 222, 237
Вроблевский С. (Wroblewsky S.), III², 291, 292*
Вудбург (Woodburg), III², 108
Вудворд (Woodward T.) II, 205
Вюльнер (Wüllner Ad.), III², 295, 331*—333, 336
Вюнш (Wünsch Chr. E.), III¹, 137*
Габбрайт (Gabbraith J. A.), III², 108
Гага Г. (Haga H.), III², 407
Гаген Г. (Hagen G.), III², 114*, 214, 215, 275, 280, 281
Гагенбах Э. (Hagenbach E.), III², 142*, 154, 177, 282, 406
Гадлей Джон (Hadley John.), II, 274*, 299

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ 431

- Гадлей Джордж (Hadley George), II, 274*
- Гайдингер В. (Haidinger W.), III², 135*
- Гайкрафт (Haucraft), III¹, 212
- Галилей Винченцо (Galilei Vincenzo), II, 60*—61, 184
- Галилей Галилео (Galilei Galileo), I, 60, 115, 130, 139, 140, 144; II, 6—14, 20, 21, 26, 36—37, 40, 41, 45, 46, 47, 48*—67*, 74, 78, 84—89, 108—113, 116, 117, 118, 139, 147, 183, 184, 223, 245; III¹, 37, 39; III², 59, 61, 198, 236
- Галлей (Halley E.), II, 142, 205, 210, 211*, 222, 227, 237, 249—251, 253, 320, 322
- Галлер (Haller A.), II, 205*
- Гальвани (Galvani A.), III¹, 33, 84*—93, 116, 117
- Гальда де (Haldat Ch. N. Al. de, 1770—1852), III², 51, 155, 354
- Гальен (Galien Jos., 1699—1782, Авиньон), III¹, 82
- Гамбергер (Hamberger G. E.), II, 320
- Гамбургер (Hamburger M.), III², 262
- Гамель (Hamel, J.), III¹, 190, 191, 193, 285
- Гамильтон (Hamilton R.), III¹, 104, 171, 228*—230; III², 88, 89
- Ганземан (Hanzemann), III¹, 209
- Ганзен П. А. (Hanzen P. A.), III², 105, 109*
- Ганкель (Hankel W.), III², 177, 318, 392*
- Ганней (Hannay J. B.), III², 267, 292, 293
- Ганстен (Hansteen Ch.), III², 181*
- Гарвей (Harvey W.), II, 7, 44, 100*
- Гаррис С. (Harris W. S.), 1797—1867, Англия), III¹, 278; III², 159, 167, 177
- Гартинг (Harting P.), III², 350
- Гарриот (Harriot Th.), II, 72* 90
- Гаррисон (Harrison J.), II, 266*
- Гартнак (Hartnack), III², 350
- Гартсекер (Hartsoeker N.), I, 139; II, 243* 250, 252
- Гасконь (Gascoigne W.), II, 179*, 200
- Гассенди (Gassendi P.), II, 15, 45, 134*—138; III¹, 34
- Гассиот Д. П. (Gassiot J. P.), III², 178, 396, 397, 401
- Гаузен (Hausen Ch. A.), II, 285*
- Гауксби (Hawksbee Fr.), II, 209, 251, 252, 281; III¹, 105; III², 285
- Гаусс (Gaus K. F.), III¹, 99, 102, 170, 171, 227*—228, 230, 235, 236, 278, 279, 284, 290; III², 46, 102—105, 159, 172, 175, 181, 385, 395
- Гаутон (Haughton S.), III², 101, 108
- Гвидуччи (Guiducci M), II, 88
- Гебер (Geber) I, 26, 83*, 84
- Гевель (Hevel J.) II, 152, 179, 183
- Геггинс (Huggins W.), III², 337, 340*, 341, 352
- Гегель (Hegel G. F. W.), I, 6; II, 31; III¹, 61, 158, 164*—165; III², 10
- Гезехус Н. А., III², 261, 262,
- Гейлинкс (Geulinx A.), II, 154*, 218
- Гейне (Heine), II, 215
- Гейсслер (Geissler H.), III², 178*

432 ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Геккель (Häckel Er.), III², 232
Гелер (Gehler), III¹, 218; III², 58, 69
Геллибранд (Gellibrand H.), II, 114*
Гельм Г. (Helm G.), III², 89*, 93, 234
Гельмгольц (Helmholtz H. v.), III¹, 146, 161, 218, 229, 257, 268, 269; III², 13, 41*—45, 47—50, 54, 56, 57, 70, 88, 91, 93, 150—152, 157, 189, 201, 224, 255, 256, 283, 321, 323, 345, 346, 350—364, 367, 378, 380—382, 385, 405, 408
Гельмонт (Helmont J. B.), II, 44
Гемфрейс А. (Humphreys A. A.), III², 280
Генглер Л. (Hengler L.), III², 249*
Генли (Henly W.), II, 328; III¹, 95*
Генри В. (Henry W., 1774—1836, хим. фабрикант в Англии), III¹, 74; III², 122
Генри Д. (Henry Jos., 1797—1878, президент Американской академии), III¹, 259; III², 379
Генри У. Ш. (Henry W. Ch.), III¹, 238
Гераклид (Heraklid), I, 37
Герепат Дж. (Herapath J.), III², 78, 226
Гербарт (Herbart J. Fr.), III¹, 166*, 168, 169
Герберт (Gerbert), I, 87*, 109
Герике (Guericke O.), II, 141, 155*—165, 167, 208
Герман (Hermann J.), II, 244
Гермбштедт (Hermbstädt, S. Fr.), III¹, 122*, 138
Герон (Heron), I, 24, 25, 53, 61, 62*, 65
Герстен (Gersten Chr. L., 1701—1762), III¹, 222
Герстнер (Gerstner Fr. J., 1756—1832, проф. в Праге), III¹, 243
Герц Г. (Herz H.), II, 18; III², 405*
Герцен, II, 24, 31
Гершель Дж. (Herschel J.), III¹, 155, 187, 199, 288*, 292; III², 27, 103, 117, 138—141, 152, 320, 346, 414
Гершель Ф. (Herschel Fr. W.), III¹, 75—76*
Гесс (Hess G. H., 1802—1850, Петербург), III², 45, 70
Гете (Goethe W. v.), I, 111, 156—163; III², 138, 150, 152
Гефнер-Альтенек (Hefner-Alteneck Fr.), III², 420
Гиггинс Бр. (Higgins Br.), III¹, 138
Гильберт (Gilbert L. W.), III¹, 103, 104, 134*, 193, 253
Гильберт У. — см. Джильберт У.
Гинтль В. (Gintl W.), III², 384*, 401
Гиортер (Hyorter O. P.), II, 279
Гипатия (Hypatia), I, 75*
Гипп (Hipp), III², 366
Гиппарх (Hipparch), I, 62*, 63, 69
Гирн Г. (Hirn G. Ad.), III², 86*, 99, 210, 256, 257
Гислинг (Giesling), II, 286
Гитторф (Hittorf W.), III², 331*, 398, 407, 415
Глан (Cilan P.), III², 349*
Гленс (Glaens) III², 108
Го (Hauy), III¹, 100
Гоббс (Hobbes Th.), II, 132, 153*, 154, 178

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ 433

- Говард (Howard L., 1772—1864, Лондон), III¹, 111
 Гови (Govi) III², 302, 319
 Гогарт (Hogart J.), III², 292
 Гоген (Gaugain. J. M., 1810—1878, французский электрик), III², 177
 Годфри (Godfrey Th.), II, 299
 Головин, III¹, 131
 Гольгер (Holger), III¹, 59
 Гольдштейн (Goldstein E.), III², 397, 400
 Гольмс (Holmes) III², 406
 Гольс (Hulls J.), II, 256
 Гольтцман (Holtzmann C. H.), III², 45, 50*, 72, 80, 91, 115
 Гольц А. (Holtz A. W.), III², 420*
 Гольцман (Holzmann, часовщик в Вене), III¹, 214
 Гонт Р. (Hunt R., 1807—1887), III², 121, 181
 Гоорвег (Hoorweg J. L.), III², 376, 409
 Гопкинс (Hopkins), III¹, 249, 250
 Гоппе Р. (Hoppe R.), III¹, 121, 192, 231, 257, 285
 Гопфнер (Hopfner), I, 14
 Гор Г. (Gore G.), III², 409
 Гораций, I, 40
 Горнер (Horner W. G.), III¹, 293
 Горсфорд (Horsford), III², 177
 Готро (Gautherot N.), III¹, 120
 Готфейль (Hautfeuille), III², 293
 Гофман (Hoffmann Fr.), II, 215
 Гофф вант (Hoff van't), III², 196
 с'Гравезанд (s'Gravesande), II, 215, 241, 244, 281*; III¹, 142, 243; III², 26
 Грайлих (Grailich W. J.), III², 370*
 Гралат (Gralaht D.), II, 288
 Грамм (Gramme Th.), III², 419*—420
 Грасси (Grassi O.), II, 88, 89, 110
 Грассман Г. (Grassmann H. G.), III², 166*—168, 187, 359, 368
 Грассман Р. (Grassmann R.), III², 187, 201*—203, 205
 Грация (Grazia V.), II, 87
 Греве (Graeve P.), III², 280
 Грегори Д. (Gregory David), II, 237, 263, 298
 Грегори Дж. (Gregory James), II, 180
 Грей (Gray St.), II, 264, 269*—270, 271, 272
 Грей Эл. (Gray E.), III², 412
 Грейнер (Greiner), III¹, 213
 Грен (Gren Fr. A., 1760—1798, проф. в Галле), III¹, 93, 95
 Гретц Л. (Grätz L.), III², 312*
 Гримальди (Grimaldi Fr. M.), II, 46, 147*—149, 183, 198, 238; III, 102
 Грин (Green G.), III¹, 171, 229*—230 Грове (Grove W. R.), III¹, 268, 269
 Гротгусс (Grothuss Th.), III¹, 123*
 Грэхем Дж. (Graham G.), II, 264*—266, 281, 289, 325
 Грэхем Т. (Graham Th.), III¹, 237, 238, III², 9, 10, 117*—119, 122, 215, 217, 266, 267

434 ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Губе (Hube J. M.), II, 284

Губер (Huber Joh.), III¹, 166

Гук Р. (Hooke R.), I, 139; II, 151, 153, 166, 176*—180, 187, 193, 198, 200, 201, 209, 220, 221—222, 238, 299; III², 126

Гульд (Gould), III², 177

Гульельмини (Guglielmini G. V., проф. математики в Болонье), III¹, 102; III², 102, 103

Гумбольдт А. (Humboldt A.), 1769—1859), I, 80; III¹, 93, 106, 278

Гунелль (Gounelle), III², 177

Гунтер (Hunter J.), II, 330

Гутенберг (Guttenberg), I, 111

Гутри (Guthrie F.), III², 228, 304*

Гэ-Люссак (Gay-Lussac L. J.), III¹, 31, 106*—111, 113, 147, 212, 214; III², 18, 53, 69, 89, 207, 213, 290, 298, 324

Гэллстрем (Hällström G. G., 1775—1844, проф. физики в Гельсингфорсе), III¹, 254; III², 360

Гюгон (Hugon), III², 97

Гюйгенс Хр. (Huyghens Chr.), I, 140; II, 41, 94, 131, 152, 153, 155, 179, 180, 181—182*, 183—189, 201, 203, 207—208, 226, 237, 238—242, 243, 244, 316; III¹, 36, 146, 152, 172, 176, 181; III², 131, 251.

Гюйо (Guyot J.), III², 228

Гютон де-Морво (Guyton de Morveau), III¹, 70, 106, 224*

Дави М. (Davy M.), III², 156

Дагерр (Daguerre L. J. M., 1789—1851, художник в Париже), III¹, 292; III², 276

Даламбер (D'Alambert Jean.), II, 245, 259, 273*—276, 298, 317

Далансе (Dalencé), II, 209, 210, 250, III¹, 114

Дальтон (Dalton J.), III¹, 31, 68, 106—110, 107*, 112—114, 116, 213; III², 69, 89, 122, 207, 290, 294

Дамиан (Damianus), I, 70

Даниэль (Daniell J. F.), III¹, 223*—224, 268—269, 283

Дарвин (Darvin E.), III¹, 213*

Дворак (Dvorak V.), III², 228, 374

Деберейнер (Döbereiner J. W.), III¹, 103; III², 73*, 138

Деген (Degen J., род. в 1756 г.), III¹, 81, 82

Деген (Degen A. F.), III¹, 236*

Дегофф (Desgoffe), III¹, 103

Дезагюлье (Desaguliers J. Th.), II, 200, 215, 271*—272, 281, 325

Дезе (Deshayes), II, 230

Дезорм (Desormes Ch. B.), III¹, 214*; III², 90

Дейман (Deimann R. J.), III¹, 94*

Декарт (Descartes R.), I, 64, 115; II, 7, 9—10, 11, 15—18, 26—27, 29, 41, 45, 72, 116, 117, 120*—134, 145, 153, 154, 161, 179, 185—186, 190, 196, 216, 226, 244, 247, 251; III¹, 21, 24, 170, 172, 188; III², 14, 200, 255

Деламбр (Delambre J. B. J., 1749—1822, астроном в Париже), III¹, 100

Деларош (Delaroche), III, 212, 213; III², 19, 79, 94

Делезенн (Delezenne Ch., 1776—1866, член Парижской академии), III², 365, 411

Деллинггаузен Н. (Dellingshausen N.), III², 233*—238, 255

Делор (Delor), II, 294

Дельбар (Dellebarre L. Fr.), II, 299

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ 435

Дельман (Dellmann F.), III², 160*, 179

Дельсо П. (Delsauls P.), III², 318

Делюк (Deluc J. A.), II, 214, 278, 284, 308, 318*—319, 321—323; III¹, 69, 79, 80, 95, 105, 113, 114, 116, 138

Демаре (Desmarest), III¹, 116

Демокрит, I, 18, 21, 22, 33, 40*, 41, 46, 51, 64

Депре (Despretz C. M.), III¹, 109; III², 25, 70*, 126, 147, 156, 304, 314, 315

Дергам (Derham W., 1657—1735, духовное лицо в Англии), III¹, 114; III², 187, 210, 253

Десен (Desains P. Q.), III¹, 210; III², 65*, 273

Дешаль (Deschales C. Fr. M.), II, 20, 133, 137, 190*—191

Джемс Г. (James H.), III², 285

Дженкин В. (Jenkin W.), III¹, 257

Дженкин Ф. (Jenkin Fl., 1833—1885, проф. в Эдинбурге), III², 176, 359

Джилльберт У. (Gilbert W.), I, 116; II, 67*—71, 100; III², 59

Джиоя (Gioja Fl.), I, 101

Джоуль Дж. Пр. (Joule J. Pr.), III¹, 218; III², 12, 13, 34—41*, 45, 49—57, 60, 61, 76—79, 91, 94, 181, 206, 210—212, 219, 302, 394

Джюрин — см. Жюрен Дивини (Divini E.), II, 242, 299

Дивиш (Diwisch P.), II, 295

Дидакус (Didacus a Stunica), II, 88

Дитрих (Dietrich J.), II, 279*

Довэ (Dove H. W.), III¹, 112, 257*, III², 151, 414

Доллонд (Dollond J.), II, 298*, 299

Доминис (Dominis M. An.), II, 89—90*

Дондерс (Donders F. C.), III², 358

Донни Ф. (Donny F.), III², 302

Допплер (Doppler Chr.), III², 8, 144*

Дорн Э. (Dorn E.), III², 221*, 407

Дреббель (Drebbel C), II, 51, 75

Дрион (Drion), III², 287

Дроз — отец и сын (Droz, P. J. и H. L. J.), II, 215

Дросбах М. (Drossbach M.), III², 201

Друммонд (Drummond Th., 1797—1843, инж.-офицер в английской армии), III¹, 290

Дрэпер В. (Draper J. W.), I, 30, 34; III², 116, 136*, 149

Дзви (Davy H.), II, 292; III¹, 23, 72*, 73, 76, 119—126, 202, 254, 291; III², 6, 53, 78, 125, 147, 423

Дзль (Dale) III², 342

Дэм (Dayme), III², 97

Дюан (Duane), III², 379

Дюар (Dewar J.), III², 316, 318, 338

Дюбуа Нансе (Dubuat Nancy), III², 215

Дювернуа (Duvernois), III¹, 106

Дюгамель (Duhamel J. M. C., 1797—1872, проф. математики в Париже), III², 68, 97, 98, 352, 365

Дюгем (Duhem P.), I, 5

436 ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Дюлонг (Dulong P.L.), II, 264; III², 113, 209—212, 211*, 214, 215; III², 19, 22, 25, 37, 51, 69, 70, 126, 308, 309
Дюма (Dumas), III², 69
Дюпре (Dupré A.), III², 104*, 105
Дюринг Е. (Duhring E. K.), I, 30; III¹; 99; III², 60, 61
Дюталь (Dutal), II, 251
Дютроше (Dutrochet R. J. H.), III¹, 237*; III², 116
Дюфе (Dufav Ch. Fr.), II, 139, 270*—271; III¹, 222
Дюфур В. (Dufour Wilh. H., 1787—1875, военный), III², 108, 109
Дюфур Л. (Dufour L., род. в 1832 г.), III², 289, 299, 300
Евдем (Eudemos), I, 51
Евдокс (Eudox), I, 42*, 43, 59
Евклид (Euklid), I, 24, 25, 54*, 60, 65, 70, 71
Евсевий (Eusebios), I, 74*
Жальябер (Jallabert L.), II, 290
Жамар (Jamard), III¹, 139
Жамен (Jamin J. C.), III², 7, 119, 122, 130*, 293, 294, 343
Жаннета Э. (Jannetaz E.), III², 68
Жермен (Germaine Sophie, 1776—1831, Париж), III¹, 139
Жерне (Gernez), III², 272
Жилло, II, 9
Жиффор (Gifford H., 1825—1882, инженер в Париже), III², 286
Жолли (Jolly Ph.), III², 101, 102, 116*, 117
Жулен Л. (Joulin L.), III², 406
Жэке В. (Jacques W. W.), III², 379
Жюрен (Jurin J., 1684—1850, врач в Лондоне), II, 277*; III¹, 104
Зантедески (Zantedeschi Fr., 1797—1873, физик в Падуе), III¹, 190, 278, 292; III², 109, 399
Замбони (Zamboni G.), III¹, 266*
Зегнер (Segner J. A.), II, 317*—318
Зеебек А. (Seebeck L. Fr. W. Aug.), III¹, 252*, 253, 291, 293; III², 129, 353, 354
Зеебек Т. (Seebeck Th. Joh.), III¹, 155, 161, 199*—201, 219, 267, 277
Зеебер (Seeber L. A., 1793—1855, проф. физики в Карлсруэ), III¹, 170
Зеегер (Seeger C.), III², 230
Зейдель (Seidel Ph. L.), III², 346*, 348
Зелльмейер В. (Sellmeyer W.), III², 344,
345 Земмеринг (Sommering S. Th., 1755—1830, член Мюнхенской академии), III¹, 193,
284
Зильберман (Silbermann Th.), III², 69*, 268
Зондгаус (Sondhauss K. Fr.), III², 371*
Зонке (Sohnke L.), III², 340
Зорге (Sorge A.), II, 260
Зульцер (Sulzer J. G.), III¹, 90*, 139
Зутер (Suter), I, 30
Иберверг (Ueberweg), I, 30
Иделер (Ideler), I, 32, 129
Иелин (Yelin, 1771—1826, Мюнхен), III¹, 200
Иергенсен (Jørgensen), III¹, 214

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ 437

- Иероним Фракасторий (Hieronymus Fracastorius), I, 119*
- Изарн (Izarn J.), III¹, 190
- Изенкраге К. (Isenkrahe C.), III², 232, 239, 242*, 243, 245—247, 250—252
- Ингенгоус (Ingenhouss J.), II, 297*; III¹, 115
- Иоганнисьянц (Johannisjanz), III², 277
- Иохман (Jochmann Em., 1833—1871, препод. гимназии в Берлине), III², 210, 214, 307
- Ирншоу С. (Earnshaw S.), III², 377
- Кабео (Cabeo N.), II, 24, 25, 114
- Кавалло Т. (Cavallo T., 1749—1809, Лондон), II, 328; III¹, 83, 93; III², 420
- Кавальери (Cavalieri B.), II, 21, 142*
- Каде (Cadet J. M.), III¹, 94
- Казреус (Casraus), II, 137
- Кайзер Г. (Kayser H.), III², 268*, 269, 271
- Калипп (Kalippos), I, 42, 43
- Калльетэ Л. (Cailetet L.), III², 265*, 266, 290, 291, 293, 294
- Кампани (Campani G.), II, 243
- Кант (Kant Imm.), II, 17, 31, 244—245, 283, 308, 333; III¹, 24, 26, 27, 30, 41*, 43—52, 54—58, 165—168, 169; III², 18, 30, 98, 184, 185, 198, 254, 277, 286
- Кантон (Canton J.), II, 295, 296*, 297, 302, 306
- Кантони (Cantoni G.), III², 297, 298
- Кантор (Cantor), I, 30, 36, 75, 83, 87, 90
- Каньяр Латур (Cagniard Latour Ch.), III¹, 234, 251*; III², 97, 287
- Капра (Capra B.), II, 51, 67
- Кардан (Cardanus), I, 101, 123—125, 124*, 138, 139
- Каркави (Carcavi P. de), II, 152
- Карлейль (Carlisle A.), III¹, 119*
- Кармарш (Karmarsch), III², 409
- Карминати (Carminati B., 1750—1830, проф. в Павии), III¹, 92
- Карно Ип. (Carnot Hup.), III¹, 218
- Карно Л. (Carnot Laz.), III¹, 231
- Карно Сади (Carnot S.), II, 20; III¹, 171, 215—218*; III², 12, 37, 45, 76, 77, 79—82, 84, 88, 90—92, 95—97, 224
- Карнелли Т. (Carnelly Th.), III², 295, 296
- Каррэ (Carré), III¹, 104*
- Карстен В. (Karsten W. J. G. 1732—1787, проф. в Галле), III¹, 95
- Карстен (Karsten Gust.), III², 121*, 152, 276
- Каскариоло (Cascariolo), II, 139, 251
- Кассини Д. (Cassini G. D.), II, 152, 171, 189, 212, 275*
- Кассини Ж. — младший (Cassini J.), II, 252, 275*
- Кассини де-Тюри (Cassini de Thury C Fr.), II, 277
- Кастелли (Castelli B.), II, 51, 67, 87, 88, 112, 117
- Кастель (Castel L. B.), II, 195
- Кастнер (Kastner K. W. G., 1783—1857, проф. в Эрлангене), III², 73
- Кателан (Catelan), II, 186
- Каули (Cawley), II, 255
- Каччини (Caccini), II, 87
- Квантен Э. ван (Quanten E. v.), III², 239

438 ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Квинке (Quincke G.), III², 131, 221, 268, 275*, 276, 343, 408
Квинтус Ицилий (Quintus Icilius G., 1824—1885, проф. в Ганновере), III¹, 201
Ке (Quet J. A.), III, 110, 397*, 398
Кейль (Keill J.), II, 237, 263*
Келлер Ф. и Эм. (Keller F. und Em.), III², 228
Кемпелен (Kempelen W.), II, 215*
Кен (Kane R.), III¹, 250
Кениг Р. (König R.), III², 357, 358*, 359, 362, 367, 368, 375—377, 379
Кениг Ф. (König F.), III², 102
Кеннингэм (Cunningham), II, 265
Кеплер (Kepler Joh.), I, 115, 134, 135, 142*; II, 45—47, 67, 71—73, 85, 86, 90—92, 220; III¹, 228; III², 28, 104
Керби (Kerby) III¹, 134
Кеслер (Kesler Fr.), II, 142
Кеттелер (Ketteler E.), III², 346*
Киарамонти (Chiaramonti S.), II, 110*
Киминелло (Chiminello, 1741—1815, астроном в Падуе), III¹, 80
Киннерсли (Kinnersley E.), II, 293
Кирхгоф Г. Р. (Kirchhoff G.), III¹, 133, 209, 229, 236, 288; III², 128, 148, 157*—160, 324—329, 333, 335, 378, 380, 395
Кирхер (Kircher A.), II, 25, 113*—114, 138—141, 183, 220; III², 138
Кислинг (Kiessling H.), III², 154*
Клавиус (Clavius Ch.), II, 87
Кламон (Clamond), III², 417
Клапейрон (Clapeyron B. P. E.), III¹, 217*; III², 45, 77, 90, 91, 95
Клапрот (Claproth M. H., 1743—1817, проф. химии в Берлине), III², 73
Кларк И. (Clark J. W.), III², 407
Кларк С. (Clark S.), II, 216, 236, 244; III¹, 261 .
Клаузен (Clausen Th., 1801—1885, астроном в Дерпте), III², 108
Клаузиус Р. (Clausius R. J. E.), III¹, 231; III², 12, 44, 50, 54, 56, 57, 79*, 80, 82—89, 92, 94—97, 153, 154, 159, 187, 206—214, 220, 224, 229, 258—260, 294, 307, 308, 310, 312—314, 376, 382—384
Клеант (Kleanthes), I, 64*
Клебш (Clebsch), III¹, 99; III², 128
Клейст (Kleist E. G.), II, 286*
Клеман (Clement), III¹, 214*. 239; III², 90
Клемент (Clement), II, 185
Клеомед (Kleomedes), I, 65*
Клеро (Clairaut A. C.), II, 275*, 288; III¹, 104
Клерселье (Clerselier C.), II, 132, 133
Клингенштиерна (Klingenstjerna S.), II, 298*, 319
Клинкерфюс (Klinkerfues E. Fr.), III², 339*, 340
Клиффорд В. К. (Clifford W. K.), III², 224
К. М. III¹, 284 Кноблаух (Knoblauch K. H.), III², 7, 62*—66, 68, 152
Кнопп (Knorr E.), III², 121
Кнохенгауэр (Knochenhauer K. W.), III², 46

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ 439

Ко (Caus S.), II, 253*—254

Кобелль (Kobell Fr.), III¹, 283

Кокс (Cox), II, 243

Кокс Г. (Cox H.), III², 108

Колладон (Colladon J. D.), III¹, 239, 250*, 251

Коллинс (Collins), III¹, 173

Коломбе (Colombe L.), II, 67, 87

Колумб (Columbus), I, 113, 114

Кольдинг (Colding L. A.), III², 51*, 52, 57, 59

Кольрауш В. (Kohlrausch W.), III², 372

Кольрауш Р. (Kohlrausch R.), III¹, 262

Кольрауш Ф. (Kohlrausch Fr.), III², 259*—262

Кольсон (Colson A.), III², 264

Коммандино (Commandino), I, 118*

Кондамин (Condamine Ch. M.), II, 275*, 277

Кондорсе (Condorcet), III¹, 100

Константинов, III², 366

Конфилиаччи (Configliacchi), III¹, 189

Коозен (Koozen J. H.), III², 128

Коперник Н. (Copernicus N.), I, 119*, 120—122, 135; II, 71, 82, 84, 87, 88, 111, 136, 137, 146

Копп (Корр. Н., род. в 1817 г., проф. химии в Гейдельберге), I, 30, 83; III¹, 113, 124, 211

Кордые (Cordier), III², 33

Корезио (Coresio), II, 87

Кориолис (Coriolis G. G.), III¹, 171, 232

Корню А. (Cornu A.), III², 134

Кортевег (Korteweg), III², 213

Котс (Cotes R.), II, 29, 30, 233*, 236, 237

Коши (Cuchy A. L.), III¹, 233*, 234, 286, 287; III², 7, 8, 127, 128, 130, 194, 200, 258, 343, 344

Крамер (Cramer G.), II, 263, 277*

Краузе (Krause), III², 254

Крауфорд (Crawford A.), II, 312, 320*; III¹, 69; III², 69, 89

Краценштейн (Kratzenstein Ch. G.), II, 290, 320*; III¹, 95

Кребс Г. (Krebs G.), III², 299*

Креве (Creve J. C. J. A., 1769—1853, врач), III¹, 93

Крелле (Crelle A. L., 1780—1855, инженер в Берлине), III², 99

Кремерс П. (Kremers P.), III², 227

Кремонино (Cremonino), II, 67

Крениг А. (Krönig A.), III², 166, 187, 206*—208, 375

Кри (Chree C.), III², 306

Крис (Kries Fr. Chr., 1768—1849, Гота), II, 309; III¹, 68

Крукс У. (Crookes W.), III², 314—318, 315*, 328, 350, 399, 400

Крэгей (Crahay), III², 108

Крюикшенк (Cruickshanks W., 1745—1800, врач и химик в Лондоне), III¹, 119, 122, 125*, 126

Крюкиус (Crucquius), III¹, 105

Крюсс Г. (Kruss G.), III², 341

440 ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Ксенофан (Xenophanes) I, 38*
- Ктезибий (Ktesibios), I, 61*, 62
- Куафье (Coiffier), II, 294
- Кук (Cooke F. W., 1806—1879, Лондон), III², 177
- Кук Д. Б. (Cooke J. B.), III², 177
- Кулон (Coulomb Ch. A.), II, 284, 326, 328*—330; III¹, 100, 101; III², 128, 159, 161, 183, 214, 216, 387
- Кумб (Coombe J. A.), III², 108
- Кундт А. (Kundt A.), III², 283, 310, 313, 333, 338, 342*—344
- Кунеус (Cunäus), II, 287
- Купфер (Kupffer Ad. Th.), III¹, 173
- Курте (Curtet), III¹, 126
- Кавендиш Г. (Cavendish H.), II, 328; III¹, 82, 94, 101*; III², 101
- Кавендиш Ч. (Cavendish Ch.), II, 289, 305; III¹, 80
- Кэмминг (Cumming), III², 177
- Кэмпбелл (Campbell), III², 108
- Кэстнер (Kästner Abr. G., 1719—1800, проф. в Геттингене), I, 30, 110, 125; II, 276; III¹, 135
- Лаборд (Laborde), III², 367
- Лавуазье А. Л. (Lavoisier Ant. L., 1743—1794), II, 320; III¹, 31, 69, 114, 121, 207, 211; III², 69
- Лагерхельм (Lagerhjelm P.), III², 51, 127*
- Ла Гир Ф. (La Hire, Ph.), II, 205, 210, 215, 275, 325; III¹, 105, 114
- Лагранж (Lagrange Sos. L.), I, 58; II, 274, 317; III¹, 32, 33, 96*—100, 128, 133, 135, 170, 206, 224, 225, 228, 230, 247
- Ладенбург А. (Ladenburg A.), III², 10
- Лакайль (La Caille N. L.), II, 277, 300
- Лакур П. (Lacour P.), III², 412
- Лаланд (Lalande), III², 115
- Лаллеман А. (Lallemand Al., 1816—1886, физик в Пуатье), III², 154
- Ламарль (Lamarle A. H. E., 1806—1875), III², 110
- Ламберт (Lambert I. H.), II, 299, 300*—302, 323, 325—326; III¹, 105, 128, 133, 135; III², 73
- Ламе Г. (Lamé G.), III², 128, 227*, 369
- Ламонт (Lamont Joh.), III¹, 278; III², 181*
- Ламонтр (La Montre), II, 250
- Ланг Ф. (Lang V., род. в 1838, проф. в Вене), III², 68
- Ланге Ф. (Lange Fr.), I, 22, 30
- Ланген (Langen), III², 97
- Лангенбек Г. (Langenbeck H.), III², 201
- Лангенбек М. (Langenbeck M.), III², 151
- Ландольт (Landolt H.), III², 296*
- Ланжевен (Langevin) I, 6
- Ланис (Lanis Fr., Francesco de Lana), II, 215; III¹, 82
- Лаплас (Laplace P. S.), I, 69; II, 211, 320; III¹, 31—33, 62*, 101—102, 104—105, 114, 133, 135, 136, 152, 170, 182, 206, 207, 211, 214, 226, 228, 230, 232, 235, 251; III², 90, 101, 102, 115, 273, 321—375
- Лассвиц К. (Lasswitz K.), III¹, 40; III², 252*, 253
- Лебайи (Lebaillit), III², 315

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ 441

- Ле Белл (Le Bel), III², 196
Левенгук (Leuwenhock), I, 139
Леве́рье (Leverrier), III¹, 187
Легат (Legat), III², 412
Лежандр (Legendre), III¹, 206
Лежен Дирихле (Lejeune Dirichlet P. G., 1805—1859, проф. математики в Геттингене), III², 159
Лейбниц (Leibniz G. W.), II, 25, 32—34, 41, 212, 218, 219, 244—247, 245*, 249, 256—257, 261, 269, 306; III¹, 40, 170; III², 200, 201, 232
Лейденфрост (Leidenfrost), III², 73, 74
Лейкипп (Leukippos), I, 40
Лека (Le Cat Cl. N.), II, 323*
Лекланше Г. (Leclanché G., 1839—1882, химик в Париже), III², 410
Лекок де-Буабодран (Lecoq de Boisbaudran), III², 228, 336
Ле-Конт (Le Conte J.), III¹, 135, 136; III², 370
Леман (Lehmann O.), III², 278*, 279, 402
Лемери (Lemery L.), II, 305
Лемонье (Le Monnier L. G.), II, 289*, 294, 295, 296
Ленин В. И., I, 5; III¹, 56
Ленуар (Lenoir), III², 97
Ленц (Lenz H. Fr. E.), III¹, 201, 238, 257*—258; III², 47, 170, 177
Леонардо да-Винчи (Leonardo da Vinci), I, 116, 117*, 137; III¹, 291
Леопольд (Leopold I.), II, 209, 249, 256
Лермит (Lhermite), III², 117
Ле-Ру (Le Roux), III², 342, 377
Ле-Руа (Le Roy Ch., 1726—1779, врач в Париже), II, 321*, 325; III¹, 222, 223; III², 314
Лерэ (Leray), III², 229
Лесаж (Lesage G. L.), III¹, 30, 34*—41, 48, 56, 284; III², 188, 200, 229, 240—242, 252
Лесли (Leslie I.), II, 209; III¹, 76—79, 77*, 210, 290; III², 65, 285
Лессинг (Lessing), II, 245
Ле-Шателье (Le Chatelier H.), III², 272
Либен А. (Lieben A.), III², 271*
Либеркюн (Lieberkühn J. N.), II, 299
Либиг И. (Liebig J., 1803—1873), III², 59, 117
Либри (Libri Gug., 1803—1869, итальянский математик), I, 30, 136; III², 73
Ливерсайдж (Liversidge A.), III², 272
Ливинг (Liveing), III², 338
Линари (Linari), III¹, 201
Линк (Link H. Fr.), III¹, 236*
Линней (Linné C. V.), II, 305
Линус (Linus Fr.), II, 167*, 200
Липперсгей (Lippershey H.), II, 74, 75, 76*, 77
Лиссажу (Lissajous J. A.), III², 364*—365
Листинг (Listing J. B., 1808—1882, проф. физики в Геттингене), III², 152
Литцендорф (Litzendorf), II, 285
Лихтенберг (Lichtenberg G. Ch.), II, 327*; III¹, 95, 129, 273

442 ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Ллойд (Lloyd H., 1800—1881, директор средней школы в Дублине), III¹, 188
Ловитц (Lowitz J. T., 1757—1804, аптекарь в Петербурге), III², 299
Локайер (Lockyer N.), III², 335*—338
Локк (Locke J.), II, 154*
Ломмель Е. (Lommel E.), III², 142*, 143
Лонгомонтан (Longomontanus Ch.), II, 137
Лопиталь (L'Hôpital de), II, 243, 261, 262
Лоран (Laurent), III², 66
Лорберг Г. (Lorberg H.), III², 383—385
Лоренц (Lorenz), III², 154
Лоренц Л. (Lorenz L.), III¹, 209; III², 131, 395
Лотце (Lotze W. H., 1817—1881, проф. философии в Берлине), III², 201, 232
Лошмидт (Loschmidt J.), III², 220*, 221
Луйе Ф. (Louyet Ph. L. Ch.), III², 265
Лукас (Lucas), II, 200
Лукреций (Lucretius), I, 64*, 66
Лулл Раймонд (Raimundus Lullus), I, 106*
Лундквист (Lundquist), III², 130, 305
Льюис (Lewes), I, 30, 34, 35, 37, 44, 49, 82, 109
Льюис (Lewis), III², 97
Людвиг К. (Ludwig K.), III², 116, 302*
Людике (Lüdicke A. Fr., 1743—1882, проф. в Мейссене), III¹, 79; III², 413
Людольф (Ludolf Ch. Fr.), II, 286*
Людтге Р. (Ludtge R.), III², 124
Маас А. (Maas A. J.), III², 155
Мавролик (Maurolycus), I, 118, 126*, 127; II, 72
Магалотти (Magalotti L.), II, 171*
Магнус (Magnus H. G.), III¹, 110, 237*;
III², 66, 67, 72, 106, 111, 122, 268,
285, 286, 308, 309
Мазеас (Mazéas G.), II, 278, 294
Мазон Ф. и Н. (Mazon F. и N.), III², 253
Майдингер (Meidinger H., род. в 1831 г., проф. в Карлсруэ), III², 410
Майер А. М. (Mayer A. M.), III², 374*
Майер И. Т. (Mayer J. T.), II, 266, 275, 322; III¹, 74, 105, 115*, 135, 192, 210, 218
Майер Роберт (Mayer J. R.), II, 31; III², 12—20, 23, 24, 27, 29—34, 32*, 36, 39—41, 49,
52—57, 59—61, 76, 79, 320, 322, 323
Майкельсон А. (Michelson A.), III², 134
Майльс (Miles H.), II, 286
Мак Грегор Дж. (M'Gregor Y.), III², 155
Маклорен (Maclaurin C.), II, 273*, 274; III¹, 234
Максвелл Кл. (Maxwell J. Cl.), III¹, 197, 231, 279, 282, 283; III², 39, 81, 86, 159, 161, 187,
211*—216, 218, 219, 224, 298, 308, 310, 311, 314, 317, 341, 376, 380—382, 393—395, 400,
405
Мальбранш (Malebranche N.), II, 154*, 218
Малюс (Malus E. L.), III¹, 148*—151, 158, 247; III², 65, 129, 133, 347

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ 443

- Маральди (Maraldi G.F.), II, 241*, 275, 277
Марангони (Marangoni C), III², 124 Марат (Marat J. P.), III¹, 70*
Марианини (Marianini S. G., 1790—1867, проф. физики в Модене), III¹, 269
Мариньяк (Marignac C.), III², 108
Мариотт (Mariotte E.), II, 167, 179, 200, 204*—207, 210, 323; III², 72, 79, 126, 207, 208, 213, 221, 281, 288—290, 324
Мариус [Marius S. (Mayr)], II, 77, 86
Марк Грек (Marcus Graccus), I, 102
Маркс К., I, 6; II, 16—17, 35
Маркс (Marx C.), III², 108
Маркус (Markus), III², 417
Марриан (Marrian), III², 411
Марсден С. (Marsden S.), III², 264
Марсе (Marcet Fr., 1805—1883, проф. физики в Женеве), III¹, 212; III², 53, 298
Марум (Marum M), III¹, 94*, 126, 188
Марци (Marci de Kronland J. M.), II, 142*—143
Маскелейн (Maskelyne N.), III¹, 101*, 171; III², 101
Массон А. (Masson A. Ph., 1806—1860, проф. в Париже), III¹, 137, 257; III², 178
Маттеуччи (Matteucci Car., 1811 — 1868, проф. физики в Италии), III¹, 293; III², 48, 64, 97
Матцка В. (Matzka W.), III², 100
Мах Э. (Mach E.), I, 5, 17; III², 339*, 364, 377
Маццони (Mazzoni J.), II, 8, 48
Мебиус (Möbius A. F.), III, 171, 227; III², 99*
Мей (May), III², 415
Мейер Г. (Meyer Herm., 1824—1856, математик в Лейпциге), III², 151
Мейер И. Ф. (Meyer J. F., 1705—1765, аптекарь в Оснабрюке), III¹, 95
Мейер Лот. (Meyer Loth.), III², 295*
Мейер О. Е. (Meyer O.E.), III², 212—222, 213*, 260, 268, 282, 283, 303, 308, 310, 312, 313, 345, 376
Мейкле (Meikle), III¹, 136
Мейстер (Meister), III², 120
Меллони (Melloni G. M.), III¹, 172, 219—222, 221*; III², 7, 62—66
Мельде (Melde Fr.), III¹, 129; III², 276, 364, 368*, 372, 373
Менделеев Дм. И. III², 287
Менелай, I, 91*
Менке (Mencke O.), II, 153
Менсбругге ван дер (Mensbrugge G. van der), III², 124, 279
Меньян (Maignan), II, 133
Меран (Mairan J. J. d'Ortous de), II, 244, 252, 268*, 277, 279; III², 316
Меркадье (Mercadier E.), III², 416
Меркель (Merkel), III², 358
Меррик (Merrick), III¹, 134
Мерсенн (Mersenne M.), II, 15, 66, 111, 115—117, 152, 183, 185, 259
Мерц (Merz), III², 350
Мессель (Messel), III², 412
Метон (Meton), I, 41*
Мециус Адр. (Metius Adrian), II, 76*

444 ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Мециус Яков (Metius J.), II, 74, 75, 76
Мешен (Mechain P. Fr., 1744—1804, астроном в Париже), III¹, 100
Миллер В. А. (Miller W. A.), III², 145*, 146, 325
Миллер (Miller W. H.), III¹, 288
Милли де (Milly de), III¹, 94
Миндинг (Minding Ferd.), III¹, 227
Мишель (Mitchel O. M.), III¹, 101; III², 177, 314
Митчерлих Э. (Mitscherlich E., 1794—1863, химик в Берлине), III², 268
Можон (Mojon G.), III¹, 189*
Мозер Дж. (Moser J.), III², 335—336*
Мозер Л. (Moser L. F.), III¹, 291—292; III², 9, 120*, 121, 149, 276
Молине (Moigneux W.), II, 209*
Молле (Mollet Jos., 1758—1829), III¹, 213*
Монардес Н. (Monardes N.), III², 138
Монгольфье Ж. (Mongolfier Jos.), III¹, 83*, 103; III², 97
Монгольфье Э. (Mongolfier E.), III¹, 83*
Монж (Monge G., 1746 — 1818, математик в Париже), III¹, 100, 106, 231
Монконис (Monconys B.), II, 267*
Монро (Monro Al., 1733—1817, проф. в Эдинбурге), III¹, 93
Монсель Т. де (Moncel Gr. Th. du, 1821—1884), III², 179
Монтанари (Montanari), II, 171*, 176, 178
Монте дель — см. Убальди Монтюкла (Montucla), I, 30
Мопертюи (Mauvertuis P. L. M. de), II, 237, 275*—276; III¹, 228, 229; III², 89
Мор (Mohr K. Fr.), III², 59, 60*
Морен (Morin), III², 366
Морен Ж. Б. (Morin J. B.), II, 137*
Морз (Morse S. F. B., 1791—1872, Нью-Йорк, по началу художник), III¹, 285
Морикини (Morichini D. P., 1773—1836, врач в Риме), III¹, 292
Морленд (Morlend S.), II, 140, 179
Морози (Morosi), III², 51
Моссоти (Mossoti O. F., 1791—1863, астроном в Пизе), III², 109
Муаньо (Moigno Fr. N. M., 1804—1884, математик в Париже), III², 156, 200
Мун (Moon), III², 136
Мунке (Muncke G. W.), III¹, 41, 57, 109, 112, 131, 134, 190, 192, 195, 196, 198*, 217, 224, 258; III², 58, 278, 318
Муррей (Murray) III², 418
Муррей (Murray J., умер в 1820 г., проф. химии в Эдинбурге), III¹, 112, 116
Мусин-Пушкин Ап. Ап. (умер в 1805 г.), III¹, 138
Муссон А. (Mousson A.), III², 275, 300*
Мутон (Mouton G.), II, 188
Мушенбрек (Musschenbroek P. van), II, 94, 278, 279*—280, 287, 302; III¹, 23, 104, 105, 114, 137, 222,
Мюллер (Müller G.), III², 341
Мюллер (Müller J. H.), I, 17; III¹, 259, 266, 269, 283, 285; III², 363*, 367
Мюллер (Müller Joh. Jac.), III², 134*
Мюр (Mure), III², 417
Навье (Navier), III¹, 227, 232

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ 445

- Наккари (Naccari), III², 306
 Наполеон I (Napoleon I), III¹, 30, 62, 125
 Нарт (Narr F.), III², 309*
 Наттерер (Natterer J. A.), III², 125*, 126
 Неезен Ф. (Neesen F.), III², 260*, 261, 317, 318
 Нейль (Neille), II, 243
 Нейман К. (Neumann C.), III², 301*, 380—382, 386, 391, 392, 395
 Нейман Фр. (Neumann Fr. E.), III¹ 211, 287*; III², 7, 48, 129, 159, 166, 168—171
 Николай Кузанский (Nicolaus de Cusa или Cusanus), I, 110*, 111
 Никольс (Nichols), III², 154
 Никольсон (Nicholson W.), III¹, 116, 117, 119*, 126, 133; III², 420,
 Ноберт Ф. (Nobert F. A., 1806—1881), III², 351
 Нобили (Nobili L.), III¹, 195, 198, 218*, 221, 257
 Нобль А. (Noble A.), III², 108
 Нобль (Noble W.), II, 259
 Нолле (Nollet J. A.), II, 208, 270, 278, 289*—291, 296, 306; III¹, 137, 237, 250; III², 314
 Норвуд (Norwood R.), II, 147, 189
 Норман (Norman), I, 128*; II, 68
 Ноэ (Noë), III², 417
 Ноэль (Noël Fr.), II, 265
 Ньепс А. (Niepce Ab. de St. Vict, 1805—1870), III¹, 291, 292
 Ньепс Ж. (Niepce Jos. Nicer., 1765—1833), III¹, 292; III², 97
 Ньюкомен (Newcomen Th.), II, 255, 256
 Ньютон (Newton I.), II, 17, 18, 28—30, 41, 130, 153, 168—169, 178, 180, 190, 191, 192*—
 203, 212, 216, 220—238, 239, 240, 241, 242, 243, 245, 249, 251, 258, 262, 263, 275, 281, 297,
 299; III¹, 21, 23, 24, 26, 30, 32—34, 39, 43, 45, 58, 96, 102, 134, 135, 143, 146, 157, 158, 160,
 161, 170, 173, 174, 178, 183, 214, 240, 243, 247, 285; III², 9, 11, 13, 14, 20, 29, 59, 98, 131,
 138, 161, 184, 198, 199, 205, 214, 215, 225, 226, 231, 233, 236, 248, 375
 Нюге (Nuguet), III¹, 105
 Обербек А. (Oberbeck A.) III², 374*
 Обермайер (Obermayer V.), III², 218
 д'Обюиссон (d'Aubuisson J. Fr.), III¹, 239*; III², 281
 Озу (Auzout A.), II, 152, 179, 243*
 Окатов М., III², 128
 Оккам (Occam), I, 100*
 Оливье (Ollivier), III¹, 103
 Ольберс (Olbers H. W.), III¹, 103; III², 102*—105
 Ольденбург (Oldenburg H.), II, 151, 193
 Ольшевский К. (Olszewski K., проф. химии в Кракове), III², 291, 292
 Ом (Ohm, G. S.), III¹ 171, 202*—205; III², 156, 157, 160, 175—177, 352, 353, 384, 398
 Освальд (Oswald), III¹, 138
 Оссиандер, II, 30
 Отто (Otto), III², 97
 Оффиреус (Offyreus), II, 215
 Паальцов (Paalzow A.), III², 304*
 Паж (Page C. E.), III², 105
 Пальмерини (Palmerini), II, 87

446 ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Памбур (Pambour), III², 96
Папен (Papin D.), II, 155, 183, 189, 207*—208, 215, 244, 255, 256—257
Папп (Pappus), I, 75*, 118, 128
Паран (Parent), II, 215, 249, 325
Парацельз (Paracelsus), I, 159*
Пардиз (Pardies I. G.), II, 201
Парис (Paris), III², 125
Парменид (Parmenides), I, 20, 21
Парро (Parrot G. F.), III¹, 125, 173*—174, 246—238, 265
Паскаль (Pascal B.), II, 15, 119, 144*—146
Пачинотти (Pacinotti A.), III², 419*
Пейрон (Peuron), III², 266
Пелле (Pellet), III², 373
Пельтье (Peltier J. Ch. A.), III¹, 201*, 267; III², 34, 47, 159, 160, 180, 388, 406
Пембертон (Pemberton H.), II, 237
Перкинс Дж. (Perkins J.), III², 73*
Перро (Perrot), III², 249
Перро Клод и Пьер (Perrault Claude et Pierre), II, 205
Персон Ш. К. (Person Ch. Cl.), III², 75, 110
Перье (Périer), II, 145
Петрарка (Petrarka), I, 109*
Петровский Г. (Pietrowski G.), III², 283
Пеурбах (Peurbach), I, 112*, 113, 119
Пешель (Peschel), I, 37, 61
Пивати (Pivati G. F.), II, 290, 291
Пигот (Pigot Th.), II, 259
Пикар (Picard J.), II, 152, 179, 189*, 210, 251; III¹, 114
Пикколомини (Piccolomini), I, 142*
Пиксий (Pixii), III¹, 260, 284
Пикте Р. (Pictet R.), III², 86, 290, 291*
Пикте (Pictet R. A.), III¹, 75*, 213
Писко (Pisko), III², 364, 367
Пифагор (Pythagoras), I, 20, 36*, 73, 74
Плана Дж. (Plana Giov. A. A., 1781 — 1864, астроном в Турине), III², 101
Планет (Planeth H.), III², 370
Планта (Planta M.), II, 297*
Планте (Plante G.), III², 423*
Плато (Plateau J. A. F.), III¹, 290, 293; III², 9, 111*—114, 124, 150, 151, 221
Платон (Platon), I, 20, 22, 23, 33, 34, 37, 38, 42*; III¹, 170
Плейфер (Playfair J., 1748—1819, физик в Эдинбурге), III¹, 77, 102
Плиний Мл. (Plinius Junior), I, 67
Плиний Ст. (Plinius Senior), I, 66*, 67, 73, 106
Плотин (Plotinus), I, 73*
Плутарх, I, 60, 61
Плюккер (Plücker J.), III, 279; III², 110, 111, 147*, 178, 331, 364, 391, 401

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ 447

- Поггендорф (Poggendorff J. Ch.), I, 6, 30, 76; III¹, 78, 192—193*, 202, 204, 233, 267, 269; III², 54, 75, 107, 110, 157, 308, 366, 420
- Полени (Poleni G., 1683—1761, гидротехник в Венеции), III¹, 105
- Поль (Pohl G. F., 1788—1849, проф. физики в Бреславле), III¹, 199
- Понселе (Ponselet I. V.), III¹, 171, 231*—232; III², 109
- Понтекулан (Pontécoulant Graf. Ph. G. Doulcet de 1795—1874, французский математик), III¹, 234
- Порретт Р. (Porrett R.), III², 407
- Порта (Porta), I, 135—139, 136*; II, 74
- Посидоний, I, 63*
- Поттер (Potter H.), II, 255; III¹, 136
- Поуэль Баден (Powell Baden), III¹, 221, 287; III², 108, 111, 151*, 342
- Прайс (Price), II, 308
- Прево (Prevost P.), III¹, 34, 41, 75*
- Престон С. (Preston S. T.), III², 86, 238, 376
- Прехтль (Prechtl Joh. Jos.), III¹, 189*, 199
- Прис (Preece), III², 413
- Пристлей (Priestley J.), II, 506, 308, 315, 330*—331; III¹, 95, 106; III², 314
- Провостэ, де-ля (Provostaye H. de la), III¹, 210; III², 65* Прокл, I, 73, 76*
- Прони (Prony G. C F. M. Riche de, 1755—1839, директор строит. уч. зав.), III¹, 100, 109
- Проут (Prout), I, 19
- Пти (Petit A. Th.), II, 264; III¹, 113, 209—212, 211*
- Пти Ф. (Petit Fr.), III², 104*, 308, 309
- Птоломей (Ptolomäus Klaudius), I, 17, 52, 62, 63, 68*—72, 85, 89, 95, 105, 121, 122
- Пуазель (Poisueille L.), III², 214, 215, 281—282*, 283
- Пуансине де-Сиври (Poinsinet de Sivry), III², 107
- Пуансо (Poinsot L.), III¹, 171, 225*—227; III², 101, 239
- Пуассон (Poisson S. D.), III¹, 131, 133, 136, 170, 175, 177, 182, 227, 228, 230, 233*—237, 245, 247, 286; III², 10, 97, 105, 110, 114, 115, 117, 127, 183, 194, 369
- Пулле (Pouillet Cl. S. M.), III¹, 204*, 205, 276; III², 27, 69, 157, 180, 262, 314, 315, 366
- Пулуй (Puluj J.), III², 218, 401
- Пушль (Puschl C), III², 228, 345
- Пфаундлер Л. (Pfaundler L.), III², 89, 296*, 298, 364
- Пфафф (Pfaff C. H.), III¹, 93, 95, 126, 259, 262, 265*, 267; III², 318
- Пьер В. (Pierre V., умер в 1886 г., физик в Вене), III², 75, 302
- Пэдж (Page Ch. G.), III¹, 285; III², 411*
- Пюиссан (Puissant L., 1769—1843, проф. геодезии в Париже), III¹, 100
- Раабе (Raabe J. L., 1801—1859, математик в Цюрихе), III², 100
- Радике (Radicke), III¹, 286
- Радо (Radau R.), III², 369
- Ральяр (Raillard), III², 153
- Рамо (Rameau J. Ph., 1683—1764, композитор в Париже), III¹, 139
- Рамсден (Ramsden J.), II, 297*
- Рамсей (Ramsay W.), III², 294*
- Рамус (Ramus), J, 125*
- Ранкин (Rankine W. J. M.), III², 12, 54, 77, 78, 81, 82*, 84, 85, 94, 95, 223, 224
- Реаль (Reaal L., 1737—1834), II, 183—184; III¹, 103

448 ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Ребук (Roebuck J., 1718—1794, врач и фабрикант в Бирмингеме), III¹, 70
Региомонтан (Regiomontanus), I, 86, 112*, 113; II, 214 Реди (Redi Fr.), II, 171* 330
Редтенбахер Ф. (Redtenbacher F.), III², 205*
Редфильд У. (Redfield W.), III², 104*
Резаль Г. (Resal H.), III², 105
Рейв (Reive), II, 243
Рейль (Reil J. Chr., 1758—1813, проф. медицины в Берлине), III¹, 93
Рейнгольд Э. (Reinhold Er.), I, 122*
Рейнольдс О. (Reynolds O.), III², 279, 301, 319*, 379
Рейс (Reis Ph.), III², 411*—412
Рейсс Ф. (Reuss F. Fr.), III², 407*
Рейта де (de Reitha A. M. S.), II, 137
Рейх (Reich), III², 26
Рейх Фр. (Reich Fr.), III², 101*, 102, 105, 180, 328
Ремер О. (Römer Ol.), II, 152, 155, 183, 189, 211—212*; III², 250
Рентген В. (Röntgen W. C.), III², 416
Ренье (Regnier E.), II, 325*
Реньо (Regnault V. H.), II, 264; III¹, 110, 137, 211, 213; III², 69, 71, 72, 94, 95, 126, 208, 314, 376, 378
Ренальдини (Renaldini C.), II, 171*
Реомюр (Reaumur R. A. F.), II, 278*, 330; III², 314
Рессонс (Ressons), II, 280
Рив А, де-ла (Rive Aug. A. de la, III¹, 212, 226, 227, 283; III², 53, 396, 398*, 406, 411
Рив Ш. де-ла (Rive Ch. G. de la, 1770—1834, проф. в Женеве), III¹, 192
Риггенбах А. (Riggenbach A.), III¹, 75, 115
Рийке П. (Ryke P. L.), III², 371*
Рикатти (Riccati G., 1709—1790, Тревизо), III¹, 128, 130
Рике (Ricke), III², 381
Риман (Riemann B.), III², 159, 384*, 395
Рисс П. (Riess P. Th.), III¹, 273*, 292; III², 46, 136, 160, 180, 276, 395
Риттер А. (Ritter A.), III², 323, 324
Риттер (Ritter J. W.), III¹, 61, 76, 77, 119—121, 120*, 125, 126, 146, 189, 265, 269, 292; III², 423
Ритчи (Ritchie W.), III¹, 78, 136, 257, 261, 290*
Рихарц А. (Richarz A.), III², 102
Рихман (Richmann G. W.), II, 296*; III¹, 115
Рихтер (Richter), III², 328
Рихтер (Richter G. Fr.), II, 200
Рицетти (Rizetti G.), II, 200
Риччи М. (Ricci M. A.), II, 171*
Риччи О. (Ricci O.), II, 8, 13, 48
Риччиоли Дж. (Riggioli G. B.), II, 137, 146*—147, 183, 189; III¹, 102
Рише (Richer J.), II, 189*—190, 230; III¹, 114
Ришелот (Richelot), III², 354 Робайсон (Robison J., 1739—1805, проф. физики в Эдинбурге), III¹,
77, 142 Роберваль (Roberval G. P.), II, 152, 186*, 191, 220, 267

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ 449

- Робинс (Robins B.), II, 281
Рого (Rohault J.), II, 130, 236
Роджет (Rojet), III², 37, 57
Родриг (Rodrigues), III¹, 227
Розенбергер (Rosenberger Ferd.), III¹, 22, 34, 56
Роити А. (Roiti A.), III², 391
Рома де (De Romas), II, 296
Романьози (Romagnosi G. D.), III¹, 189—191
Ромерсгаузен (Roraershausen E.), III², 160*
Роскоэ (Roscoe), III³, 146, 149
Ротман (Rothmann), II, 73
Роулэнд Г. А. (Rowland H. A.), III², 382*
Румкорф (Ruhmkorff H. D., 1803—1877, конструктор физических приборов в Париже), III², 178, 179, 331
Румфорд [Rurmford (B. Thompson)], II, 302; III¹, 31, 70—74, 71*, 77—78, 114—116, 141, 218, 235, 289, 290; III², 6, 36, 51, 53, 69, 73
Рундель В. В. (Rundel W. W.) III², 104
Рупп (Roupe H. W.), III¹, 109
Рутерфорд (Rutherford D., 1749—1819, врач в Эдинбурге), III¹, 23, 81
Рюльман Р. (Ruhlmann R.), III¹, 74, 218; III², 85, 95, 398*, 402
Савар (Savart F.), III¹, 193, 194, 239, 243, 244, 247—252, 248*; III², 113, 369
Сван У. (Swan W.), III², 146
Сагредо (Sagredo), II, 50, 51, 53
Сакстон (Saxton), III¹, 261
Сальва (Salva), III¹, 284
Сальвиати (Salviati), II, 50, 53
Сальвино Армати (Salvino degli Armati), I, 107, 108*
Сан Мартино (San Martino G.), III¹, 80
Сеген (Seguin M.) III², 50*, 53, 200
Секки А. (Seechi A.), III², 108, 156, 238*, 239, 247, 255, 340
Секст Юлий Фронтин (Sextus Julius Frontinus), I, 68*
Сенармон А. де (Senarmont H. de), III², 67, 68*
Сен Венан (Saint Venant Ad., J. Cl. Barré de), III², 128*, 200
Сенгверд (Senguerd W.), II, 209*
Сенека (Seneca), I, 66*, 76
Сент Клер Девиль Э. Г. (Sainte Claire Deville), III², 265*, 322
Серр де (Serres M. de), III¹, 191
Сестини (Sestini), III², 145*
Сиго (Sigaud de la Fond), II, 297*
Сикс (Six J., умер в 1793 г. член корол. общества), III¹, 81
Сильвестр (Sylvester), III², 108
Сильвиус (Sylvius de la Voë), II, 44
Сименс В. (Siemens Werner), III², 176—178, 349, 366, 369, 384, 415, 417*—421
Сименс К. В. (Siemens K. Wilhelm), III², 321*, 322
Симмер (Symmer R.), II, 304*
Симон (Simon P. L., 1767—1815, инженер-строитель в Берлине), III¹, 126

450 ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Сир (Sire), III², 110
Сиртурус (Sirturus H.), II, 78
Скиапарелли (Schiaparelli), I, 43
Скотт Э. (Scott E. L.), III², 365—367
Скотт Руссель (Scott Russel), III², 144
Слогетт (Slogett), III², 156
Смит (Smith), III², 156
СМИТ Р. (Smith R.), II, 277*, III¹, 142
СМИТ У. (Smith W.), III², 415
СМИТОН (Smeaton J., 1724—1792, гражданский инженер в Лондоне), III¹, 114
Снеллий (Snell W.), II, 94*, 95
Совер (Sauveur J.), II, 257*—258, 259—260; III², 365
Созиген (Sosigenes), I, 64*
Соке (Socquet J. M.), III¹, 116
Сократ (Sokrates), I, 37*, 43
Сомервиль (Somerville Mary, 1790—1872), III¹, 292
Сомерсет [(Уорчестер) (Somerset Ed., Marquis of Worcester)], II, 254, 255
Соре Ш. (Soret Ch.), III², 301*, 302
Сорель Э. (Sorel E.), III², 373
Соссюр Г. де (Saussure H. B. de), II, 284, 321; III¹, 78—80, 79*, 105, 111; III², 180
Соссюр Т. де (Saussure N. Th. de), III², 267
Спенсер (Spenser), III¹, 283
Спиноза (Spinoza B.), I, 246
Спринг В. (Spring W.), III², 263, 264
Станкари (Stancari V. Fr.), II, 257*, III¹, 251
Стевин (Stevin), I, 130*—132, 143; II, 60, 146
Стегелин (Stähelin), III¹, 278
Стеккли (Stuckely W.), II, 284
Стеноне (Stenone N.), II, 171
Стерджен (Sturgeon W.), III¹, 259*, 260
Стефан (Stefan J.), III², 305, 309*, 311, 375, 376
Стивенсон (Stevenson), III², 156
Стокс Г. Г. (Stokes G. G.), III¹, 136; III², 132, 140*—143, 215, 325, 329
Стругаль (Strouhal V.), III², 372, 373
Сэбин (Sabine E., 1788—1883, английский моряк и физик), III², 215, 415
Сэвери (Savery T.), II, 254, 255
Сэжэ Ж. Фр. (Saigey J. Fr.), III², 315
Сэл (Sale), III², 415
Стюарт (Stewart), III¹, 77
Стюарт Б. (Stewart Balfour), III², 39, 148*, 224, 303
Таккер (Thacker A.), III², 108
Талейран (Talleyrand), III¹, 100
Тален Р. (Thalén R.), III², 332, 334, 335, 337
Тальбот (Talbot W. H. F.), III¹, 288*, 292
Таннери (Tannery S. P.), I, 19, 26
Тарджиони (Targioni C. A.), II, 243
Тарджиони (Targioni G.), III², 107

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ 451

- Тарталя (Tartaglia N.), I, 118, 123*, 124; II, 12, 13, 49
Тартини (Tartani G.), II, 260
Тевно (Thévenot M), II, 171*, 179
Телезий (Telesius), I, 126*
Тенар (Thénard L. J., 1777—1857, химик в Париже), III¹, 122, 126
Тен Эйк (Ten Eyk), III¹, 259
Теодорик (Theodorich), I, 108*
Теофраст (Theophrastus), I, 51
Теплер А. (Töpler Aug.), III², 420*
Терквем А. (Terquem A., 1831—1887, Лиль), III², 371
Террье (Terrier), III², 110
Тессан (Tessan D., 1804—1879, французский метеоролог), III², 133, 179
Тилорье (Thilorier), III², 125, 293
Тиндаль Дж. (Tyndal J.), III¹, 28, 51, 253, 255, 257, 262, 275, 278, 282; III², 54—56, 55*, 61, 67, 75, 142, 286, 368, 370, 371, 379, 416
Тиссеран (Tisserand), III², 230
Тихо де-Браге (Tycho de Brahe), I, 115, 121, 122, 133*, 134*, 135; II, 47, 68, 71 — 73, 79—81, 183
Томлинсон (Tomlinson Ch.), III², 272, 279
Томлинсон (Н.), III², 306
Томпион (Tompion), II, 164
Томпсон Б. — см. Румфорд
Томсен И. (Thomsen Jörg.), III², 70*
Томсон Дж. (Thomson James.), III², 94*, 290
Томсон (Thomson Thomas, 1773—1852, проф. химии в Эдинбурге), III¹, 112
Томсон У. (Thomson Will.), III¹, 229, 282; III², 12, 39, 40, 54, 56, 80—82*, 84, 85, 90, 91, 94, 95, 159—161, 176, 187, 219, 221, 224, 229, 240, 255, 256, 290, 294, 320, 325, 384, 394
Торичелли (Torricelli Ev.), II, 13, 21, 46, 112, 117*—119, 144
Тоунлей (Townley R.), II, 167, 200
Травельян (Trevelyan A.), III¹, 253, 255
Тралесс (Tralles J. G., 1763—1822, проф. математики в Берлине), III¹, 112
Треска Э. (Tresca H. E.), III², 263*, 264
Тромсдорф (Trommsdorff J. W., 1770—1837, проф. химии в Эрфурте), III¹, 138
Трост (Troost L.), III², 265*
Труствик (Troostwijk A. P. van), III¹, 94*
Тэйлор (Taylor Br.), II, 258*—259, 263
Тэнтер С. (Tainter S.), III², 415, 416
Тэт П. (Tait P. G.), III², 23, 39, 54, 56*—60, 86, 186, 229, 303, 316, 318, 325, 384, 385
Уальд (Wild H.), III², 417
Уайтгерст (Whitehurst J., 1713—1788, часовщик в Лондоне), III¹, 70
Уард (Ward S.), II, 193
Уатсон (Watson W.), II, 286, 289*, 291, 295, 305, 330*; III¹, 84
Уатт Дж. (Watt James), II, 256, 285, 323*—325; III¹, 108
Уатт М. (Watt M.), III², 318
Убальди дель Монте (Ubaldi del Monte), I, 128*; II, 49, 50, 54, 87
Уилер (Wheeler Gr.), II, 269, 271

452 ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Уильсон (Wilson B.), II, 295*, 305, 306
Уистон (Whiston), II, 253
Уитстон (Wheatstone Ch.), III¹, 133, 205, 274*, 288, 291; III², 111, 147, 157, 177, 178, 357, 363, 364, 366, 367, 417, 418
Улива (Uliva Ant.), II, 171*
Унвин (Unwin W. C.), III², 284*
Уокер (Walker), III², 109
Уокер Дж. (Walker J.), III², 130
Уокер (Walker S. C., 1805—1853), III², 177
Уолластон (Wollaston W. H., 1766—1828, Лондон, врач), III¹, 77, 146, 147, 155, 183, 184, 265, 289, 292
Уотерстон (Waterston), III², 227, 320
Уре (Ure A., 1778—1857, химик в Лондоне), III¹, 109
Уэвелл (Whewell Will, 1794—1866, Кембридж), I, 30, 49; III¹, 180; III², 54
Уэллер (Waller A.), III², 121, 154
Уэльс (Wells W. Ch.), III¹, 93, 222*—223
Уэльш (Walsh J.), II, 330*
Фабброни (Fabbroni G. V. M.), III¹, 93*, 125, 265
Фабри (Fabri H.), II, 166, 171*, 175
Фабриций (Fabricius J.), II, 7, 86
Фавр (Favre P. A.), III², 69*, 268
Фай (Faye H. A. E. Al., род. в 1814 г., астроном в Париже), III², 133
Фалес (Thales), I, 19, 34*
Фарадей М. (Faraday M.), II, 308; III¹, 28, 197, 238, 253—283, 254*; III², 8, 37, 57, 77, 125, 126, 155, 156, 177, 221, 227, 287, 370, 371, 391, 393, 395, 399, 402, 405, 420
Фаренгейт (Tahrenheit G. D.), II, 266*, 267
Феддерсен (Feddersen B. W.), III², 300
Феон (Theon) I, 75
Фепплъ (Föppl A.), III², 397
Ферма (Fermat P.), II, 132*, 133, 220
Фернель (Fernel), I, 119*
Фессель (Fessel Fr.), III², 110, 111, 363, 364
Фехнер Г. Т. (Fechner, G. Th.), II, 308; III¹, 112, 183, 203, 258, 259, 267, 268, III², 150, 155, 162, 182, 187, 191, 193*—201, 203, 253, 374
Физо Ип. (Fizeau H. L.), III², 8, 64, 121, 132*—135, 149, 178, 339, 391, 394
Фик А. (Fick Ad.), III², 30, 116, 277*, 278
Филиппс Дж. (Philipps J.), III², 108
Филиппс Р. (Philipps R.), III², 154
Филолай (Philolaus), I, 37
Филон Византийский (Philon), I, 25, 63*
Финкенер Р. (Finkener R.), III², 318
Фирмиан Лактакций (Firmianus Lactantius), I, 74*
Фирмик Матерний (Firmicus Maternus), I, 74*
Фирордт К. (Vierordt K.), III², 348*, 349, 374
Фихте (Fichte J. H.), III², 201
Фицджеральд (Fitzgerald), II, 256
Фишер И. К. (Fischer J. K., 1760—1833, проф. физики), I, 30; III¹, 40, 58

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ 453

- Фишер Н. В. (Fischer, N. W.), III¹, 116, 138, 237*; III², 74
Флейшер (Fleischer), I, 126*
Флудд (Fludd R.) II, 191*
Флэмстид (Flamstead J., 1646—1719, астроном в Гринвиче), III¹, 285
Фляйт (Flight), III², 322
Фогель Г. (Vogel H. C, проф. в Потсдаме), III², 349
Фогель Г. В. (Vogel H. W.), III², 338
Фожа де-Сен-фон (Faujas de St. Fond B.), III¹, 83*
Фолькман (Volkmann), III², 151
Фолькс (Folkes M.), II, 289
Фома Аквитанский (Thomas Aquitanus), I, 99
Фонвиелль де (Fonvielle de W.), III², 318
Фонтана (Fontana F.), II, 179
Фонтенель (Fontenelle B.), 11, 237*
Фор (Faure J.), I, 14
Фор К. (Faure C.), III², 423
Форбс (Forbes G.), III², 134
Форбс (Forbes D. J.), III¹, 208*, 221, 253, 289; III², 63, 64
Фордайс (Fordyce G., 1726—1802, врач в Лондоне), III¹, 70
Форсельман-де-Геер (Vorsselmann de Heer P., 1809—1841), III², 46
Фоскарини (Foscarini), II, 88
Фосс [Voss Is. (Vossius)], II, 94, 131, 176*; III¹, 222
Фоулер (Fowler R.), III, 93, 117
Франкенгейм (Frankenheim M. L), III¹, 201, 236*
Франклин Бен. (Franklin B.), II, 219, 291*—295, 305, 330; III¹, 115, 241, 250; III², 123, 156
Франц Р. (Franz R.), III¹, 208; III², 67
Фраунгофер (Fraunhofer Jos.), II, 204; III¹, 172, 183*—185, 187; III², 146, 326
Френель (Fresnel A. I.), III¹, 23, 24, 170, 173—187, 174*, 232, 240, 285—287; III², 7, 65, 128—131, 194, 314
Фриз (Fries J. F.), III¹, 58
Фритч Г. (Fritsch H.), III², 238
Фузиньери А. (Fusinieri Am., 1773—1853, врач в Винченце), III¹, 238; III², 123
Фуко (Foucault J. B. L.), III², 9, 64, 107—110, 108*, 134—135, 147, 149, 394
Фуркруа (Fourcroy A. Fr. de, 1755—1809, проф. химии в Париже), III¹, 70, 122, 126
Фурье (Fourier J. B. J.), III¹, 171, 179, 200, 205*—208, 216; III², 194, 277, 278, 353, 354
Фусс (Fuss), II, 299
Ханыков Н. В., I, 80, 82, 90, 92, 93
Хвольсон О. Д., I, 6
Хеттон (Hutton Ch.), III¹, 101*; III², 101
Хладни (Chladni E. Fl. Fr.), III¹, 32, 128*—131, 133—135, 137—140, 214, 241, 244, 245
Христиани А. (Christiani A., 1842—1887, физик в Берлине), III², 373
Христиансен (Christiansen C.), III², 342, 344
Цан (Zahn), III², 359*, 368
Цейнер (Zeuner G.), III², 84, 92*
Целльнер И. (Zöllner I. R. F.), II, 301; III², 230*—232, 249, 295, 317—319, 333, 340, 341, 346—348, 350, 381, 407
Цельсий (Celsius And.), II, 278, 279* 322

454 ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Цех (Zech), III², 249
Циамициан Ciamician G.), III², 336
Циглер (Ziegler J. H.), III¹, 108*; III², 73
Цицерон (Cicero), I, 31, 57, 60, 73
Цох И. (Zoch J. B., директор средней школы в Сараево), III², 371
Цукки Н. (Zucchi N.), II, 116*
Чатмари А. (Szathmari A.), III², 379
Челлис Дж. (Challis J.), III¹ 136, 286; III², 132*, 227, 228, 318
Честер [Chester (Chestermorehall)], II, 299
Чили К. (Szily K. v.), III², 88*
Чильдрен (Children J. G.), III¹, 126*
Чинтолези (Cintolesi F.), III², 297, 298
Чирнгаузен (Tschirnhausen E. W.), II, 243*
Шаар (Schaar M., 1817—1867, проф. в Женеве), III², 108
Шаден (Schaden E.), III¹, 166 Шаль (Chasles M., 1793—1880, проф. математики в Париже), III¹, 227
Шампион (Champion), III², 373
Шарль (Charles J. A. C), III¹, 83*—84, 107, 291
Шатле (Chatelet), II, 237, 244
Шаффготш (Schaffgotsch), III², 369*
Шварц (Schwarz), III¹, 252, 253
Шварц Б. (Schwarz B.), I, 103
Швейггер (Schweigger S. Chr.). I, 33; III². 189, 191—193, 192*; III², 159
Шверд (Schwerd Fr. M.), III¹, 187*; III², 128
Швильге (Schwilgué J. B.), III, 103
Шевандье (Chevandier), III², 127
Шеврель (Chevreul), III¹, 101
Шееле (Scheele K. W.). II, 323
Шейблер (Scheibler J. H., 1777—1838, фабрикант), III¹, 254; III², 365, 386
Шейнер (Scheiner Chr.), I, 99; II, 26, 47, 74—75, 86, 92*—94, 110
Шейхцер (Scheuchzer), II, 322*
Шеллинг (Schelling Fr. W. J.), III¹, 59—62*, 158, 164, 189, 284
Шельбах (Schellbach R. H.), III², 228*
Шенбейн (Schönbein Chr. Fr.), III¹, 268*, 269, 423
Шерер (Scherer Al. N. 1771—1824, член Петербургской академии), III¹, 138
Шефлер (Schfeffler), III¹, 227
Шиллер Н. Н., III², 382
Шиллинг Пав. Льв. (1786—1857, русский дипломат), III¹, 284
Шимпер (Schimper), III², 286
Шлезингер И. (Schlesinger J., род. в 1831 г., проф. в Вене), III², 227
Шлёмильх (Schlömilch O.), III², 100*
Шмидт (Schmidt G. G. 1768—1837, математик в Гиссене), III¹, 106, 109, 113, 198
Шмук (Schmuck E. J.), III¹, 93
Шнебели Г. (Schnebelli H.), III², 262
Шобер (Schober), II, 322
Шотт (Schott K.), II, 47, 141*—142, 157, 159, 215
Шпенгель (Spengel), III², 34

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ 455

- Шпиллер Ф. (Spiller, Ph.), III², 232*, 233
 Шпренгель (Sprengel H.), III², 286
 Шпринг В. (Spring W.), III², 154, 263, 264
 Шрамм Г. (Schramm H.), III², 240*—247, 252
 Штампфер (Stampfer S., 1792—1864, проф. математики в Вене), III¹, 293
 Штейнгель (Steinheil K. A. 1801—1870, физик в Мюнхене), III¹, 284; III², 346, 415
 Штерер (Stöhrer E.), III¹, 261
 Штирлинг (Stirling), III², 97
 Штрекер (Strecker K.), III², 313
 Штрельке (Strehlke), III², 72
 Штремер (Strömer M.), II, 279
 Штро А. (Stroh A.), III², 404
 Штурм (Sturm Joh. Chr.), II, 209*, 215; III¹, 78
 Штурм (Sturm J. R. Fr.), III¹, 239. 250*—251
 Шубич (Subic S.), III², 206*
 Шуленбург (Schulenburg), II, 178
 Шумахер (Schumacher W.), III², 118
 Шумейстер (Schumeister J.), III², 278
 Шустер (Schuster A.), III², 402
 Шюблер Г. (Schübler G.), III², 179
 Эвинг (Ewing I. A.), III², 359
 Эвктемон (Euktemon), I, 41*
 Эдисон Т. (Edison Th.), III², 368, 412*, 413, 414
 Эдлунд (Edlund E.), III², 386*—389, 391, 392, 396, 401, 407, 408
 Эйзенлох В. (Eisenlohr W., 1799—1872, проф. физики в Карлсруэ), III², 143, 224
 Эйзенлох Ф. (Eisenlohr F., род. в 1836 г., проф. математики в Гейдельберге), III², 130, 341
 Эйлер (Euler L.), II, 240, 250, 258, 262, 266, 272*, 273, 275, 277, 279, 281, 285, 287, 297—298, 299, 306, 308—315, 316, 317; III¹, 53, 128, 129, 131, 133, 135, 139, 140, 172, 246
 Эйтельвейи (Evtelwein), III², 365
 Эйткен (Aitken J.), III¹, 223
 Экснер (Exner Fr., род. в 1849 г., проф. физики в Вене), III², 279, 408
 Экфант (Ekphantus), I, 37
 Эли (Élie B.), III², 405
 Эльзас А. (Elsas A., род. в 1855 г., доцент в Марбурге), III², 369
 Эльстер (Elster), III², 407
 Эмпедокл (Empedokles), I, 17, 20, 21, 39*, 40, 41
 Энгельс Фр., I, 16, 17; II, 19—20, 31; III¹, 56
 Эндрюс (Andrews Th.), III², 69*. 287—290, 292—295
 Эмсмманн А. Г. (Emsmann A. H., род. в 1810 г., проф. в Штеттине), III², 138, 141, 150
 Энгельманн (Engelmann R.), III², 348
 Эпикур, I, 18, 22, 51; III¹, 35, 36
 Эпинус (Aepinus Fr. U. Th.), II, 302, 303*—304, 305—306
 Эратосфен (Eratosthenes), I, 61*, 85
 Эрдманн (Erdmann J. Fr., 1778—1846, проф. в Дерпте), III¹, 122

456 ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Эри (Airy G. В., род. в 1801 г., директор Гринвичской обсерв.), III², 101, 108, 129
Эрикссон В. (Ericson W.), II, 321*
Эрикссон (Ericsson J.), III², 97*
Эрклебен (Erxleben J. Chr. P., 1744—1777, проф. физики в Геттингене), III¹, 139
Эрман (Erman P., 1764—1851, проф. физики в Берлине), III¹, 111, 237; III², 395
Эрстед (Oersted H. Ch.), III¹, 171, 189—194, 191*. 197, 200, 235, 267; III², 51, 103, 104, 160
Эттингсгаузен А. фон (Ettingshausen An. v., 1796—1878, проф. в Вене), III², 99, 100
Эшвейлер (Eschweiler), III², 108
Юз (Hughes D. E.), III², 412*, 413
Юм Д. (Hume D.), II, 217
Юнг Д. (Young J.), III², 134
Юнг Д. Р. (Young J. R.), III², 108
Юнг М. (Young M.), III¹, 139*
Юнг Т. (Young Th.), III¹, 23, 32, 73, 140*, 142—147, 152, 154, 172—176, 178—180, 186, 187, 231, 249; III², 6, 126, 129, 131, 222, 273, 364, 366, 405
Якоби К. Г. Я. (Jacobi K. G. I.), III¹, 99, 234*, 235, 237, 283; III², 50
Якоби М. Г. (Jacobi M. H.), III¹, 257, 260*, 283; III², 176, 177, 366
Якобсон (Jacobsohn H.), III², 283
Ямвлих (Jamblichus), I, 74
Янсен (Jansen Zach), I, 140; II, 74, 75, 93
Ятс С. (Yates S.), III², 412, 414

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ 457

ко второму выпуску третьей части „Истории физики“ Ф. Розенбергера

- Аберрация света 131—133
- Абсорбция газов 122—123, 266—271
- Агрегатные состояния 262—264, 287—300
- Адиабата 84
- Адиабатическое состояние 323—324
- Аккомодация глаза 151
- Аккумуляторы 422—423
- Акустика 6, 189, 352—379
- Акустическая прозрачность воздуха 379
- Атмосфера луны 324
- Атомистика 10, 187, 191—222, 238—257, 310—314, 334—339
- Ахроматизм 161
- Биения 359—563
- Блеск металлический 342
- Блеск тел 151
- Броуновское движение 278—279
- Бунзеновская горелка 146
- Вес тепловой 84
- Весы индукционные 414
- Влияние электрическое 420
- Водяной воздушный насос 286
- Волновая теория света 133—134
- Волновая теория теплоты 76
- Волновая теория электричества 155, 405
- Волны водяные, их успокоение маслом 123
- Вращение плоскости поляризации света, магнитное 65
- Вращение тел 110—113
- Время удара тел 262
- Второе начало теории теплоты 12—13, 79—88, 91—92
- Вязкость жидкостей 281
- Газовая машина 97
- Газы, кинетическая теория 78—79, 187, 206—222, 307—314, 3.16—317, 375—377
- Гальванизм 156—176, 380—393
- Гармоника химическая 369—370
- Гармония музыкальная 363
- Гироскоп 110
- Глаз 150—152
- Глазное зеркало 152
- Гласные звуки 357—359
- Горизонтальный маятник 249—250
- Давление динамическое 286
- Дагерротипия 120
- Движение брошенных тел 105—106
- Движение вихревое 255—256, 285
- Двойное лучепреломление теплоты 63—64
- Двустороннее телеграфирование 384

458 ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Действие на расстоянии (*actio in distans*) 230—231, 247—248, 385, 390, 404—405
Диосмос 116—119
Дисгрегация 83
Дисперсия света 341—346
Диссонансы 363
Дифракция тепловых лучей 63—64
Диффузия газов 119, 214, 265—266, 300—301
Диффузия жидкостей 118—119, 277—278
Диффузия твердых тел 264—265
Дихроизм 135
Диэлектрики 382, 392—395
Дополнительные цвета 150
Жидкие пленки 113—114, 368
Закон Авогадро 207
Закон Дальтона-Гэ-Люссака 207
Закон Мариотта 72, 79, 207, 290
Закон Ома 156—157
Звуки от трения 372—373
Звуковые цвета 354—357
Земной индуктор 175
Земной магнетизм 180—181, 407
Изомерия 195—196
Иммерсионные системы 350
Индуктор барабанный 419—420
Индуктор дифференциальный 414
Индукционные весы 414
Индукционные приборы 179
Индукция гальваническая 48, 168—171, 390
— униполярная 391
Интенсивность электрического тока 172—174
Интерференция звука 374, 377—378
Интерференция света 135
Интерференция теплоты 64
Интерференция электричества 155, 405
Иррадиация 151
Испарение твердых тел 294, 295
Истечение воды 281
Калейдофон 364
Калоресценция 142
Калориметрия 72
Кальцесценция 142
Капиллярность 113—116, 273—275
Катодные лучи 402—403
Кипение жидкостей 297
Колебания жидких пленок 368
Колебания простые и сложные 352, 353
Колебание синусоидальное 353

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ 459

Колебания упругих пластин 369

Коллоиды 118

Комбинационные тоны 360—362

Конвекция электрическая 407

Конденсация газов — см. сжижение газов

Контактное электричество 46—47, 408—409

Коэффициент набухания 117

— скольжения 283—284

— упругости 127

Кристаллизация 299—300

Кристаллоиды 118

Критическая точка газов 287—288

Крутильные весы 159—160

Магнетизм 45—48, 180—183, 400

Масса 236—237, 240, 245

Материя лучистая 401—403

— теория 93—94, 184—257, 337—339, 345, 382—387

Машины волновые 363, 364

— динамоэлектрические 418—420

— термодинамические 96—97

— электрофорные 420

Маятник Фуко 107—109

Меры абсолютные 13, 172—176, 309—311, 349

Метеорология 153—154

Методы физики 10—11, 41—42, 100—101, 222—223, 225—226, 325

Механика 8—9, 97—128, 257—287

Микроскоп 350—351

Микроскоп вибрационный 364

Микрогазиметр 414

Микрофон 412—413

Молекулы, их свободные пути 212—213

— их скорость 78—79, 210—212

— их столкновение 217

— их размер 114, 220—221

— их число 220

Молния 179

Мультипликатор 420

Мыльные пленки 113—114

Натурфилософия — см. материя и силы физические

Невесомые 23, 328—390

Непроницаемость материи 234

Обертонны 353—359

Облака 153

Оптика 7—8, 128—154, 324—352

Оптика физиологическая 150—152

Опыт Лейденфроста 73—75

460 ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Опыт Плато 111—112
- Отклонение падающих тел 101—105
- Отклонение снарядов 105—106
- Отражение света от прозрачных тел 129—131
- Отражение света полное 131
- Отражение теплоты 63
- Отталкивание акустическое 228
- Охлаждение при испарении 74, 291
- Охлаждение тел 309
- Параллелограмм сил 98—100
- Паровая машина 95—97
- Пары, их упругость 71—72
- Перегретый лед 295—296
- Передача силы 421—424
- Перпетуум мобиле (Perpetuum mobile) 43, 57
- Пламена манометрические 367—368
 - поющие 369—373
- Плеохроизм 135
- Плотность земли 101
- Поглощение света 135—136, 148, 326, 342—346
- Поглощение теплоты 62, 67—68, 326
- Положения Карно 80—81
- Поляризация света 129—130
 - теплоты 63
 - электрическая 47
- Последствие упругое 258—262
- Потенциал 46, 380—386
- «Потные» изображения 120—122
- Поющий волчок 373
- Превращение сил 14—61
- Преломление тепловых лучей 63
- Приливы и отливы 29
- Прилипание газов и жидкостей 268—276
- Принцип Гамильтона 88
- Принцип наименьшего действия 88
- Притяжение и отталкивание материи 191, 202, 204, 226—233, см. также тяготение
- Пыльные фигуры 377
- Работа 13 и сл. 224—225
- Радиометр 314—319
- Радиофония 416
- Разветвление электрического тока 157—158
- Разностные тоны 360
- Разряды электричества 178—179, 396—403
- Рассеяние энергии 81
- Растворение твердых тел 271—272, 292—293
- Растекание жидкостей 123, 124, 276
- Расширение тепловое 71

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ 461

Резонанс 355

Резонанс оптический 329

Резонаторы Гельмгольца 355

Световые лучи темные 137, 140, 151—152, 1403

Свет электрический 423

Свободная длина пути молекул 212

Сжижение газов 125—126, 290—293

Сила мускульная 70

— осмотическая 117

— тока 173—174

— тяжести — см. тяготение

Силы молекулярные 94, 195, 218—219, 258—259

— напряжения 42—43, 225

— стержневые 44

— физические 6—7, 11—13, 13—61, 97—101, 163, 165—166, 184—185, 190—193, 198—204, 379—380, 383—390, 392—395, 404—405

Сирена электрическая 362

Скольжение жидкостей 283—294

Скорость распространения звука 375—379

— распространения света 132—134

— распространения тяготения 248—250

— распространения электричества 177—178

Созвучия 363

Сонометрия 373—374

Сопrotивление гальваническое 175—177, 414

Сохранение силы 12, 14—16, 251

Спектральные линии, их смещение 338—341

— явления и спектральный анализ 137, 138, 144—149, 152, 324—341

Спектроскоп реверсивный 340

Спектроскопы 328—329, 340—341

Стробоскопический диск 363

Суммовые тоны 360

Сфера действия молекул 213, 221

Сфероидальное состояние материи 73—74

Телеграфия 384—410

Телефоны 368, 411—414

Температура абсолютная 79, 89—93

— критическая 287—290

Температуропроводность 305

Теория теплоты механическая 76—97, 300—313

Тепловое вещество 89

Тепловой вес 84

Теплопроводность 214, 303—314

Теплопроводность кристаллов 67—68

Теплопрозрачность 65—67

Теплота 12—13, 24, 33—39, 45, 57, 61—97, 192, 287—324

Теплота лучистая 62—67

— от изменения объема 72

— от химических процессов 69—71

— удельная 71—72, 79, 94, 312—314

462 ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Термодинамическая функция 84
Термодиффузия 301
Термометр 292
Термостолб 417
Термофония 416
Термоэлектричество 47, 409
Течения в жидкостях 284—285
Течение твердых тел 262—263
Тоны органичных труб 371
Тоны от щели 373
Точка замерзания, понижение ее давлением 94—95
Трение внутреннее 119, 214—218, 280—286
Тяготение 18—21, 187—188, 226—251
Удар тел 252—253
Упругость газов и паров 71
Упругость материи 234, 252, 253
Упругость твердых тел 126—128
Фигуры Лиссажу 364, 365, 368
— равновесия вращающихся жидкостей 111—112
Флюоресценция 138—144
Фонаутограф 367, 369
Фонографы 367—369
Фонтан 280—281
Фосфоресценция 136—138
Фотография 352
Фотометрия 346—350
Фотофон 415
Функция Карно 91—92
Химические действия звука 373
— действия света 149, 351—352
— действия теплоты 336—338
— действия электричества 46—47, 173
Хронограф 377
Хроноскоп 365—367
Цвета тепловые 63, 67
— атмосферы 153—154
Цвет воды 154
Цвета мутных сред 152
— субъективные 150
Цветовое ощущение 150
Цилиндрический индуктор 420
Чувствительное пламя 370
Эквивалент теплоты 17, 19—20 35—39, 51—56
Эквивалент эндосмотический 116
Электрические машины — см. машины электрофорные, динамоэлектрические и т. д.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ 463

Электричество 8, 13, 21—22, 44, 45—48, 155—183, 192, 202—203, 204, 379—424
— атмосферное 179—180

Электричество от трения 46, 172, 406—408

— при прохождении жидкостей через пористые перегородки 407

Электродинамические законы, основные 162—174, 380—390

Электродинамометр 171—172

Электрометр 160—161

Электромоторные машины 417—423.

Электропроводность 178, 396—397

Электротехника 409—424

Электрофор 420

Элементы гальванические 410

— их диссоциация 336—338

Эндосмос — см. диосмос

Энергия 89, 185, 223—225, 236

— солнца 27—29, 319—324

Энтропия 84

Эолова арфа 372

Эфир 129, 139, 156, 184, 197—198, 202, 227—229, 235—236, 239, 242—243, 247—248,
344—346, 386—392, 401—403

Редакция *А. П. Юшкевича*. Оформление *И. Я. Костиной*. Корректурa *А. И. Рунова*.
Сдано в производство 7/VIII 1935 г. Подписано в печать 22 II 1936 г. Печ. лист. 28. Бум.
л. 14.
Тираж 10.000.
Формат 62X94¹/₁₆ Печ. знак, в 1 б./л. 120.000. У. а. л. 35. Заказ № 914.
Ред. общетехн. дисциплин № 24. Уполн. Главлита № В—35520. Цена 9 р. Пер. 1 р.
2-я типогр. ОНТИ имени Евгении Соколовой. Ленинград, просп. Красных Командиров,
29.